

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

На правах рукописи

Ходинев Иван Александрович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ
УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ВЖ175 И ВКНА-1ВР**

2.6.17 – Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., М.А. Горбовец

Москва – 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	8
1.1 Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов.....	8
1.2 Асимметрия цикла нагружения	15
1.3 «Мягкое» и «жесткое» нагружение	21
1.4 Заключение по первой главе.	26
2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	28
2.1 Объекты исследования	28
2.2 Методы исследования.....	32
2.3 Заключение по второй главе	38
3. ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	39
3.1 Фрактография ВЖ175	39
3.2 Фрактография ВКНА-1ВР	57
3.3 Заключение по третьей главе	72
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ	74
4.1 Влияние условий нагружения на пределы выносливости.....	74
4.2 Малоцикловая усталость при «жестком» нагружении.....	80
4.3 Малоцикловая усталость при «мягком» нагружении	93
4.4 Сопоставление "мягкого" и "жесткого" циклов нагружения.....	101
4.5 Заключение по четвертой главе	107
5. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА	108
5.1 Обобщенные кривые усталости. Обоснование выбора силового подхода.....	108
5.2 Оценка долговечности при произвольной асимметрии цикла	114
5.4 Заключение по пятой главе	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Разработка и изготовление современных авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) идут по пути ужесточения режимов эксплуатации с целью повышения их коэффициента полезного действия и экономической эффективности. Жаропрочные никелевые сплавы, легированные редкоземельными элементами и имеющие направленную структуру, как моно-кристаллические сплавы, однородную структуру, как порошковые сплавы, выдерживают значительные температурные и механические нагрузки. Однако даже эти сплавы имеют ограничения по времени эксплуатации в зависимости от нагруженности, интенсивности эксплуатации и воздействия окружающей среды.

Сопротивление малоцикловой усталости (МЦУ) материала относится к основным характеристикам для проведения расчетов на прочность и ресурс элементов конструкций АГТД. Испытания на МЦУ проводят в условиях упруго-пластического деформирования исследуемого материала. При этом в качестве контролируемого параметра нагружения может выступать как напряжение («мягкий» цикл), так и деформация («жесткий»). Изменение неконтролируемого параметра нагружения при проведении массовых испытаний на МЦУ при «мягком» цикле не фиксируется, хотя представляет большой интерес.

В РФ испытания на МЦУ для большинства материалов проводили при «мягком» нагружении, а при «жестком» нагружении начаты испытания в последние двадцать лет. Тем не менее, в зарубежных странах авиационный двигатель может быть сертифицирован и допущен для применения, только если для всех материалов, применяемых в его конструкции, определены характеристики МЦУ при «жестком» цикле.

Для принятия решения о возможности применения материала в двигателе конструктору необходимо располагать набором свойств, обеспечивающих заданную долговечность в ожидаемых условиях эксплуатации. При проведении общей квалификации (паспортизации) объем испытаний, как правило, ограничен минимально необходимым набором характеристик. Химический и фазовый состав сплавов, применяемых в АГТД, имеет значительные различия, механические свойства заготовок из сплавов сильно отличаются и зависят не только от состава, но и от термообработки, кристаллографической ориентации, величины зерна и технологии изготовления полуфабриката (литьё, деформирование или аддитивное производство). Выявление закономерностей изменения характеристик малоцикловой усталости в зависимости от параметров нагружения и установление взаимосвязи параметров упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении позволит проводить полную оценку долговечности и механизмов разрушения деталей из сплавов при варьировании их химической и фазовой структуры.

Целью диссертации является установление зависимости изменения характеристик малоциклового усталости образцов жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР от параметров нагружения в условиях контролируемых деформации и напряжения.

Задачи диссертационной работы:

– исследовать влияние асимметрии цикла и температуры на сопротивление малоциклового усталости образцов из используемых в авиационной промышленности дискового жаропрочного никелевого деформируемого сплава ВЖ175 при температурах 20, 650, 750 °С и лопаточного литейного интерметаллидного жаропрочного никелевого сплава с равноосной структурой ВКНА-1ВР при температурах 20, 850, 1050 °С в условиях контролируемых деформации и напряжения («мягкого» и «жесткого» нагружения);

– установить связь между механизмами разрушения и параметрами нагружения образцов сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;

– установить зависимости между параметрами упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175;

– разработать метод оценки долговечности деталей из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении.

Научная новизна диссертационной работы состоит в получении автором следующих результатов:

1. Разработан метод оценки долговечности образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при температурах 20, 850, 1050 °С при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении при испытаниях на малоцикловую усталость.

2. Впервые установлена связь механизма разрушения с параметром нагружения (деформация или напряжение), асимметрией цикла нагружения и температурой испытания для образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С;

3. Впервые установлена связь параметров петли упруго-пластического гистерезиса (для «жесткого» цикла: размах пластической деформации, амплитудное и среднее значение напряжения, а также характер их изменения в процессе испытания; для «мягкого» цикла деформация циклической ползучести, амплитудное и среднее значение полной деформации в цикле, а также характер их изменения в процессе испытания) с контролируемым параметром нагружения и асимметрией цикла для сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С.

4. Впервые установлено, что симметричное «мягкое» и «жесткое» нагружение эквивалентны для образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С за счет циклической стабильности этих материалов.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Установлена возможность сокращения объема усталостных испытаний (до трехкратного) за счет выявленной эквивалентности испытаний при «мягком» и «жестком» симметричном цикле образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850 и 1050 °С.
2. Установленные соответствия между механизмами разрушения и параметрами нагружения позволят определить, какие условия нагружения привели к разрушению детали и соответствовали ли эти условия расчетным.
3. Предложен метод оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла, который может быть использован при расчетах ресурса деталей ГТД.
4. Впервые определены характеристики малоциклового усталости новых жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175, внесены дополнительные сведения в паспорта № 1649 и № 1805.
5. Разработан стандарт организации 1-595-33-456-2014 «Методика испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения жаропрочных сплавов для авиационных ГТД».

Методология и методы исследования

Исследования свойств материалов были проведены с учетом требований отечественных и зарубежных стандартов. Для проведения исследований использованы классические инженерные подходы, основанные на гипотезах и теориях механики разрушения, механики деформируемого твердого тела, материаловедения.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты испытаний на малоцикловую усталость сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР при «мягком» и «жестком» цикле нагружения, при разных асимметриях цикла ($R=0$, $R=-1$, $R=0,5$), температурах испытания (20°С, 650°С и 750°С для ВЖ175; 20°С, 850 °С и 1050 °С для ВКНА-1ВР);
- результаты фрактографического анализа испытанных образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;
- исследование влияния температуры и асимметрии цикла на сопротивление малоциклового усталости образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;
- результат анализа характера упруго-пластического деформирования при различных условиях нагружения образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;
- исследование применимости методов оценки долговечности при произвольном коэффициенте асимметрии цикла образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР.

Апробация работы

- XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Екатеринбург, 2016);
- XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 2019);
- Всероссийская научно-технической конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства» (Москва, 2021);
- XIV Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 2022)..

По материалам диссертации опубликовано 12 работ, включая три статьи в ведущих научных изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России; две статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в базе цитирования Scopus [1-12].

Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава // *Авиационные материалы и технологии*. – 2023. – №1(70). – С. 126-136.

2. Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ*. – 2022. – №1(107). – С. 97-110.

3. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // *Труды ВИАМ*. – 2018. – № 9. – С. 51-60.

Публикации, индексируемые в базе Scopus:

1. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy during asymmetric loading // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019, – №9, – P. 889-893.

2. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Letnikov M.N. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy at symmetric and asymmetric deformation // *Inorganic materials: applied research*. 2019, – №4, – P. 846-852.

Публикации в других изданиях:

1. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при асимметричном нагружении // *Металлы*. – 2019. – №5. – С. 57-62.

2. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при симметричном и асимметричном деформировании // Материаловедение. – 2018. – №1. – С. 3-9.

3. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А., Лукьянова М.И. Исследование малоциклового усталости жаропрочных сплавов при «жестком» цикле нагружения // Цветные металлы. – 2017. – № 2. – С. 91-95.

4. Ходинев И.А. Исследование влияния коэффициента асимметрии цикла на малоцикловую усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 9-22.

5. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВКНА 1-ВР / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 41-64.

6. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175/ Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. // Материалы Всероссийской конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства». — М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2021. – С. 99-121.

7. Ходинев И.А. Влияние температуры испытания и асимметрии цикла на МЦУ при заданной деформации жаропрочного сплава ВЖ175 / Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н.// Материалы XI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2019. – С. 90-106.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов

Проблема разрушения деталей при малоцикловом нагружении

Детали машин и элементы конструкций часто подвергаются повторяющимся нагрузкам, при этом возникающие циклические напряжения могут привести к микроскопическим физическим повреждениям соответствующих материалов. Даже при напряжениях, значения которых значительно меньше предела прочности данного материала, эти микроскопические повреждения могут накапливаться при непрерывном циклировании, пока не перерастут в трещину или другое макроскопическое повреждение, которое приводит к выходу из строя компонента детали. Этот процесс повреждения и выхода из строя из-за циклической нагрузки называется усталостью. Использование этого термина возникло, когда исследователям казалось, что циклические напряжения вызывали постепенное, не сразу наблюдаемое, изменение способности материала сопротивляться нагрузке.

В настоящее время усталостные разрушения остаются серьезной проблемой в инженерном проектировании. Экономические затраты на профилактику и устранение последствий выхода из строя конструкций и механизмов довольно велики. Так, приблизительно 80 % из этих затрат связаны с ситуациями, когда циклическая нагрузка и усталость являются, по крайней мере, сопутствующими факторами. Усталости подвержены мосты, краны, оборудование для силовых установок и машин, конструкции и механизмы, используемые в нефтедобывающей промышленности, а также детали самолетов – в частности, диски и лопатки газотурбинных двигателей (ГТД). [1, 12-30]

Наиболее высоконагруженные элементы дисков ГТД работают при воздействии нагрузок, которые носят циклически-повторный характер, что обусловлено эксплуатационным (полетным) циклом. При этом пиковые значения напряжений, вызванных преимущественно инерционными нагрузками, могут превышать предел текучести материала, а число циклов, за которое развивается трещина усталости, обычно составляет порядка 10^3 – 10^5 . Накопление и развитие повреждений при таком режиме эксплуатации обусловлены механизмами малоцикло-вой усталости (МЦУ). Свойства МЦУ влияют непосредственно на долговечность и надежность воздушного судна с ГТД. [1, 31-33]

Следует отметить значимость фратографических исследований при анализе поломок деталей ГТД. Анализ изломов позволяет идентифицировать причину разрушения детали, оценить условия нагружения и сопоставить их с расчетными, что далее приведет к повышению точности расчетов и развитию расчетных методов оценки ресурса деталей ГТД. [1, 34-37]

Жаропрочные никелевые сплавы в газотурбинных двигателях

Наиболее высоконагруженные детали ГТД эксплуатируют в условиях высоких температур, больших статических и циклических нагрузок. Для работы в таких условиях были разработаны жаропрочные никелевые сплавы, сохраняющие высокие характеристики кратковременной прочности, сопротивления малоцикловой и многоцикловой усталости, ползучести и трещиностойкости при высоких температурах [38-40].

В качестве объектов исследования настоящей диссертационной работы выбраны сплавы, используемые в наиболее нагруженных элементах газотурбинного двигателя, – дисковый жаропрочный никелевый сплав ВЖ175 и лопаточный жаропрочный никелевый сплав ВКНА-1ВР.

Определяющие соотношения малоцикловой усталости

Деформационные подходы, используемые для исследования усталости металлов, основываются на разделении амплитуды деформации на упругую и пластическую составляющие [2, 41-46]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ae} &= \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (N_p)^b, \\ \varepsilon_{ap} &= \varepsilon'_f \cdot (N_p)^c\end{aligned}\quad (1.1)$$

Уравнение Басквина-Мэнсона-Коффина, связывающее амплитуду полной деформации и количество циклов до усталостного разрушения, имеет вид:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (N_p)^b + \varepsilon'_f \cdot (N_p)^c, \quad (1.2)$$

где ε_a – амплитуда полной деформации, N_p – количество циклов до усталостного разрушения, σ'_f – коэффициент усталостной прочности, ε'_f – коэффициент усталостной пластичности, b – экспонента усталостной прочности, c – экспонента усталостной пластичности, E – модуль упругости. Это выражение справедливо для случая нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = -1$.

Кривая циклического деформирования может быть представлена уравнением Рэмберга-Осгуда:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K}\right)^{1/n} \quad (1.3)$$

где $\Delta\varepsilon/2$ – амплитуда полной деформации, $\Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжений, E – модуль Юнга, K – коэффициент циклической прочности, n – коэффициент циклического упрочнения.

Зависимости долговечности от напряжения и деформации в цикле аппроксимируют степенной функцией, после логарифмирования зависимость преобразовывается в линейную:

$$N_f = A \cdot \Delta \varepsilon^B; N_f = C \cdot \Delta \sigma^D$$

$$\lg N_f = a + b \lg \Delta \varepsilon; \lg N_f = c + d \cdot \lg \Delta \sigma,$$
(1.4)

где a, b, c, d, A, B, C, D – константы, определяемые с использованием регрессионного анализа.

Приведенные соотношения отражены в стандартах, содержащих рекомендации по обработке результатов усталостных испытаний [47-48].

Обзор работ, посвященных малоциклового усталости жаропрочных никелевых сплавов

Характеристикам малоциклового усталости жаропрочных никелевых сплавов посвящено множество работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [39-56] и других отечественных исследователей [57-58]. В рамках этих работ исследованы характеристики усталости с учетом влияния на них параметров нагружения, исследованы механизмы разрушения и изменение структуры сплавов при циклическом воздействии.

За рубежом также активно публикуют результаты исследований малоциклового усталости жаропрочных никелевых сплавов [59-68].

В работе [59] исследована малоциклового усталость жаропрочного никелевого сплава GH4169 при температуре 650 °С при контроле деформации в цикле. Испытания прерывали на определенных долговечностях для проведения испытаний на одноосное растяжение. На рисунке 1.1 приведены зависимости максимальных напряжений от долговечности и отмечены промежутки долговечности, после которых испытания прерывали.

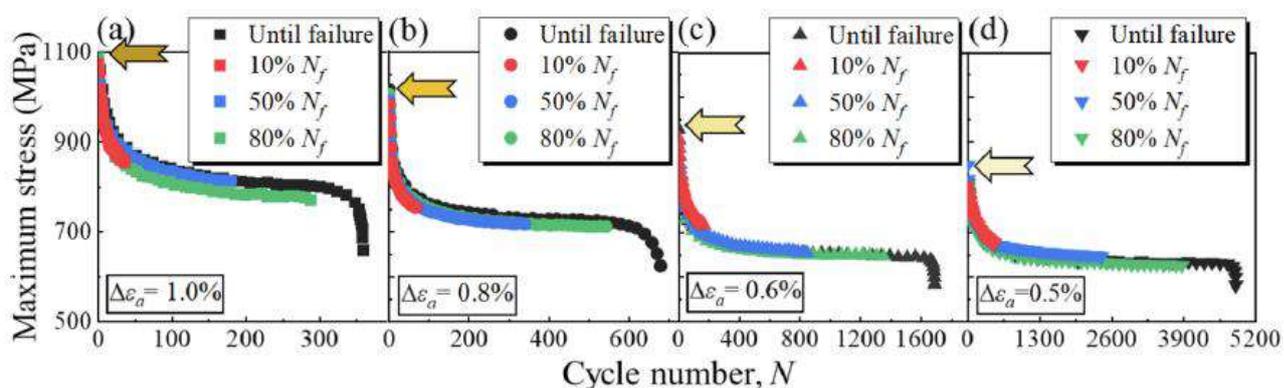


Рисунок 1.1 – Промежутки долговечности, после которых прекращались испытания

Это позволило связать микромасштабное повреждение от малоциклового усталости и макромасштабную деградацию свойств. На рисунке 1.2 представлены полученные зависимости характеристик кратковременной прочности от времени предварительного малоциклового нагружения. Здесь $R_{p0.2}$ – условный предел текучести, R_m – предел прочности, A_{12mm} – относительное удлинение.

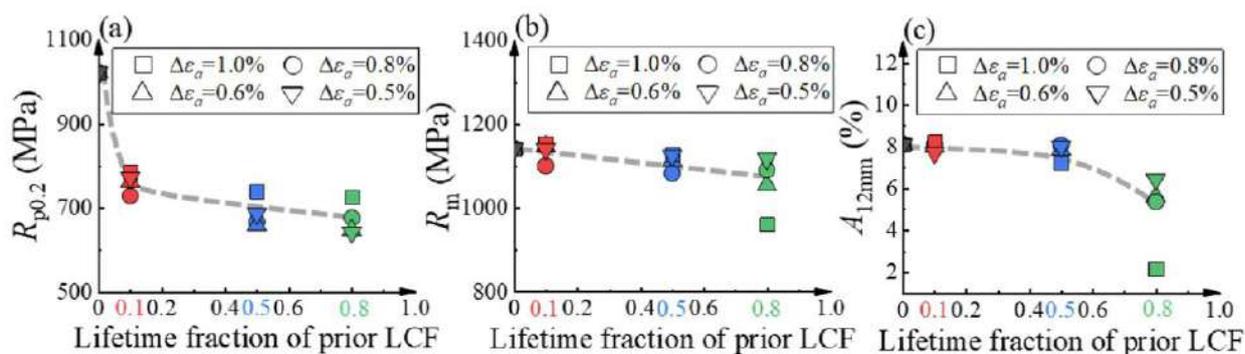


Рисунок 1.2 – Зависимость свойств кратковременной прочности от длительности предварительного малоциклового нагружения

Также было исследовано влияние продолжительности предварительного малоциклового нагружения на изменение структуры образцов. На рисунке 1.3 показана зависимость параметра GND, характеризующего степень разориентации зерен, от продолжительности предварительного малоциклового нагружения.

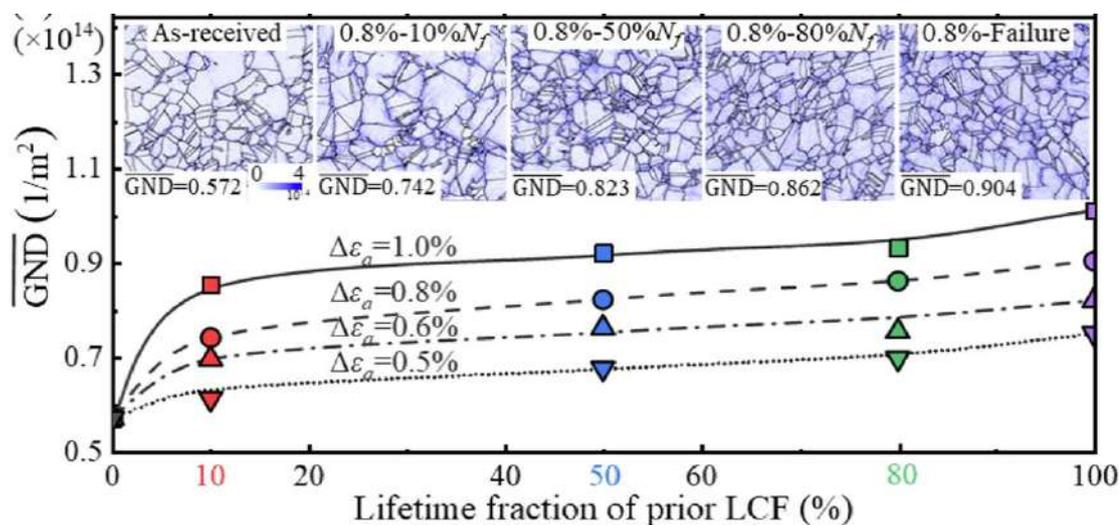


Рисунок 1.3 – Зависимость разориентации зерен от продолжительности малоциклового нагружения

На основании этих результатов уточнен механизм деградации механических свойств, вызванных высокотемпературной малоцикловой усталостью, и разработан метод оценки степени повреждения деталей. Параметр поврежденности включает в себя напряжение, пластическую деформацию и степень деградации микроструктуры, выраженную через величину средней разориентации зерен.

В ряде работ предлагают модификации известных моделей для оценки долговечности. Так, в работе [60] авторы предложили модель на основе соотношения Смитта-Уотсона-Топпера, согласно которой долговечность помимо напряжения, деформации и констант материала зависит от размера зерна:

$$\frac{1}{2} \Delta \varepsilon_t \sigma_{max} = k d^\alpha (2N_f)^\beta, \quad (1.5)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение цикла; $\Delta \varepsilon_t$ – размах деформации; d – характерный размер зерна; $2N_f$ – циклы до разрушения; k , α , β – константы материала.

Работа [61] посвящена механизмам малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава SU-263 при температурах 800, 850, 900 °C при контроле деформации в цикле. Авторами исследованы изломы образцов, параметры упруго-пластического гистерезиса, определены константы уравнения Мэнсона-Коффина. Также получена зависимость механизмов разрушения от температуры и уровня нагружения, как показано на рисунке 1.4:

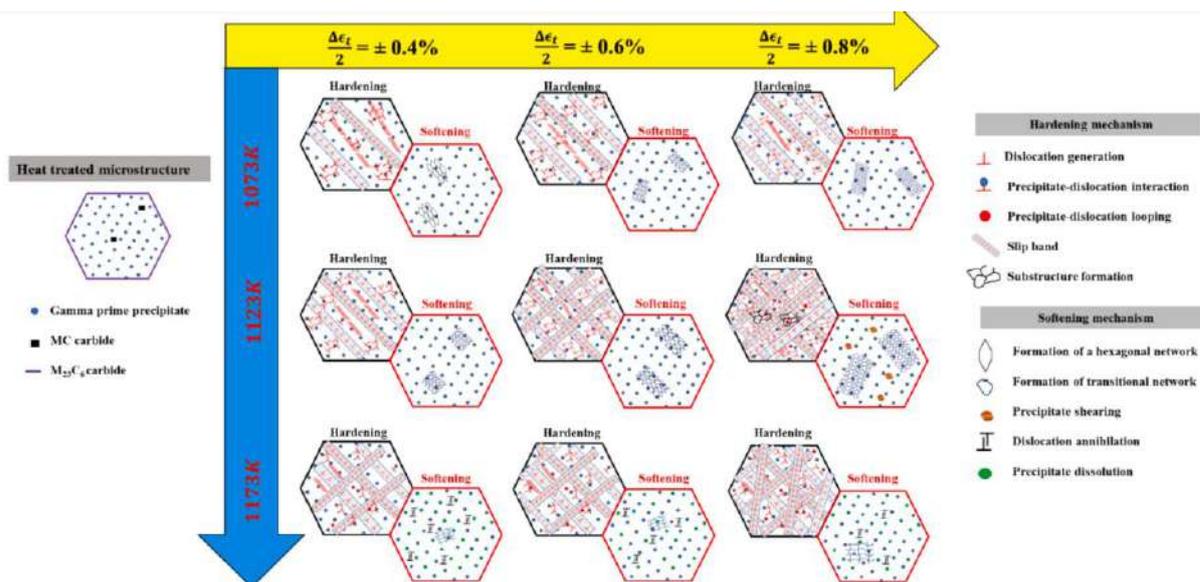


Рисунок 1.4 – Зависимость механизмов разрушения от температуры и деформации в цикле для сплава SU-263

В работе [62] исследована малоцикловая усталость жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 при температурах 300, 650, 730 °C при различных скоростях нагружения. Испытания проведены при симметричном цикле нагружения при контроле деформации. Кроме того, часть испытаний была проведена с выдержкой в цикле. Проведены металлографические исследования (рисунок 1.5).

Приведены зависимости максимальных и минимальных напряжений в цикле (рисунок 1.6), а также развитие петель упруго-пластического гистерезиса (рисунок 1.7) для различных температур и скоростей нагружения.

Предложена модель, в которой параметр повреждения включает в себя повреждение от усталости (на основе модели Мэнсона-Коффина), повреждение от ползучести и повреждение от высокотемпературной коррозии (рисунок 1.8). Отмечено, что при высоких частотах нагружения доля урона от усталости значительно больше, чем от ползучести и коррозии.

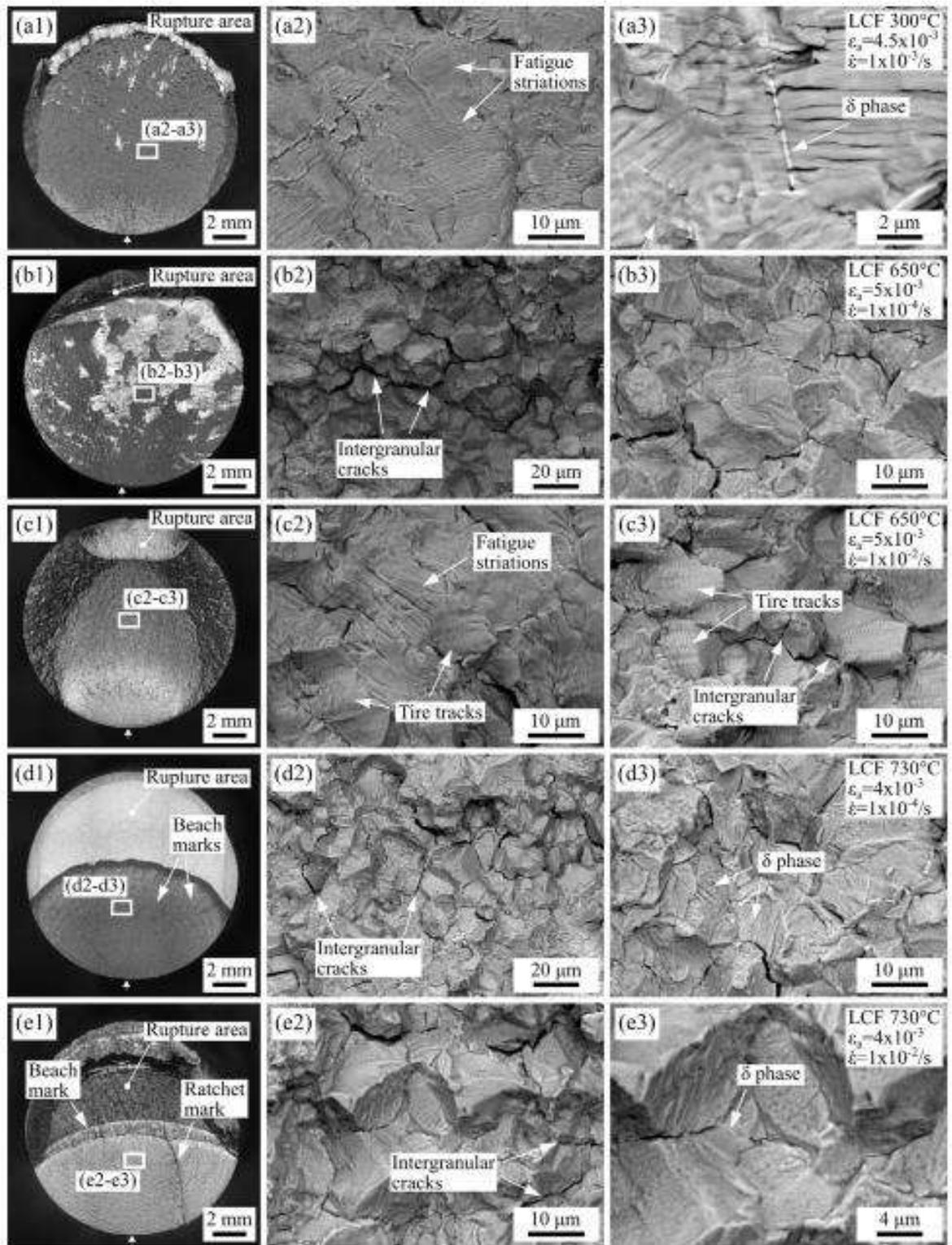


Рисунок 1.5 – Изломы образцов Inconel 718, испытанных при различных температурах и скоростях нагружения.

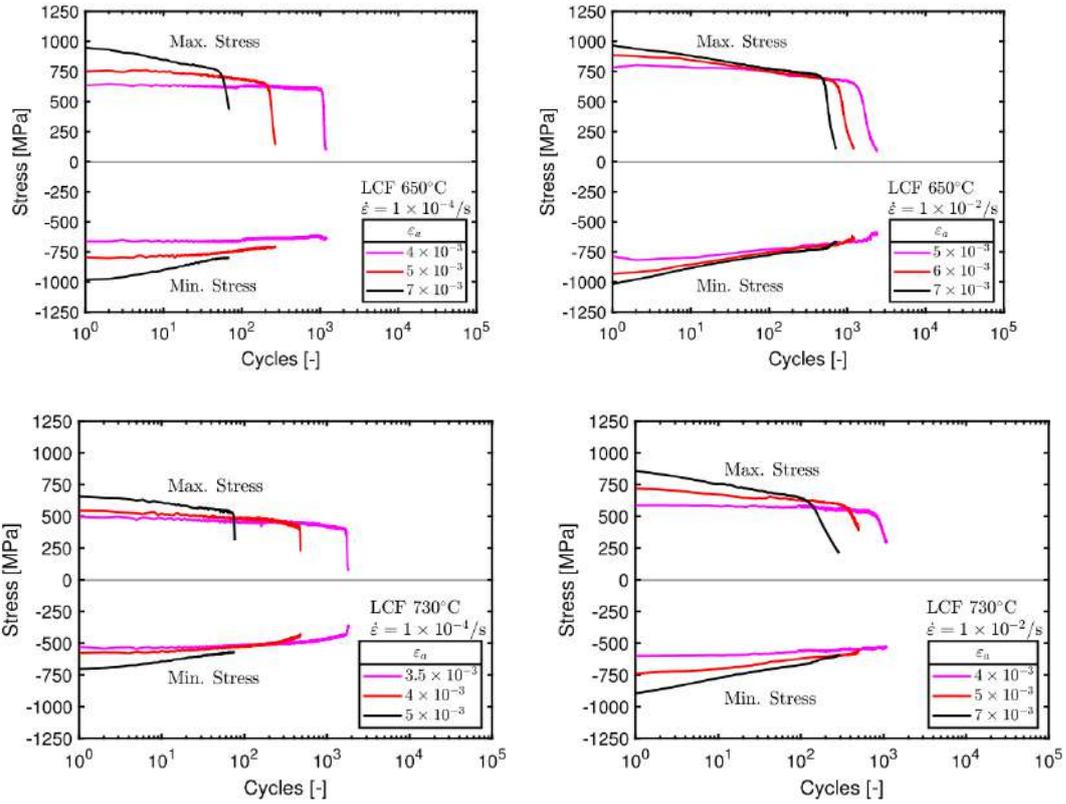


Рисунок 1.6– Изменение максимальных и минимальных напряжений образцов из Inconel 718

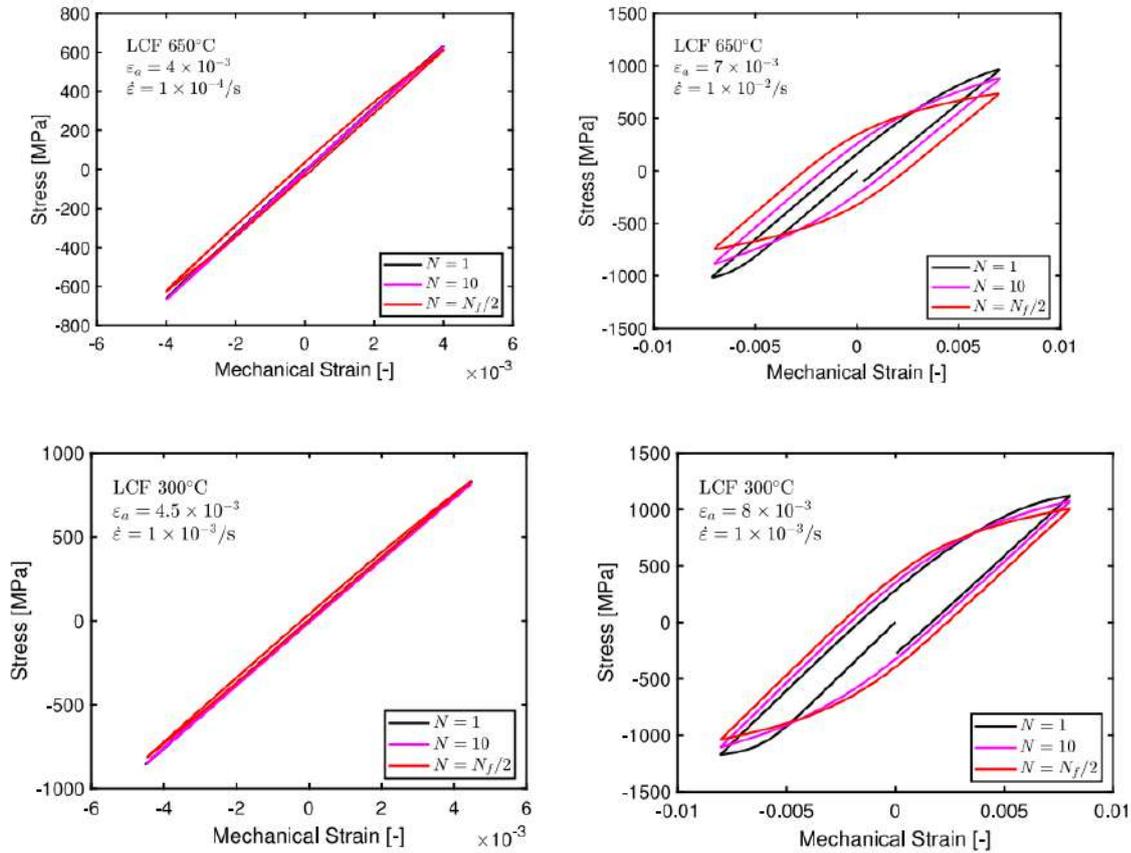


Рисунок 1.7 – Развитие петель упруго-пластического гистерезиса образцов из Inconel 718

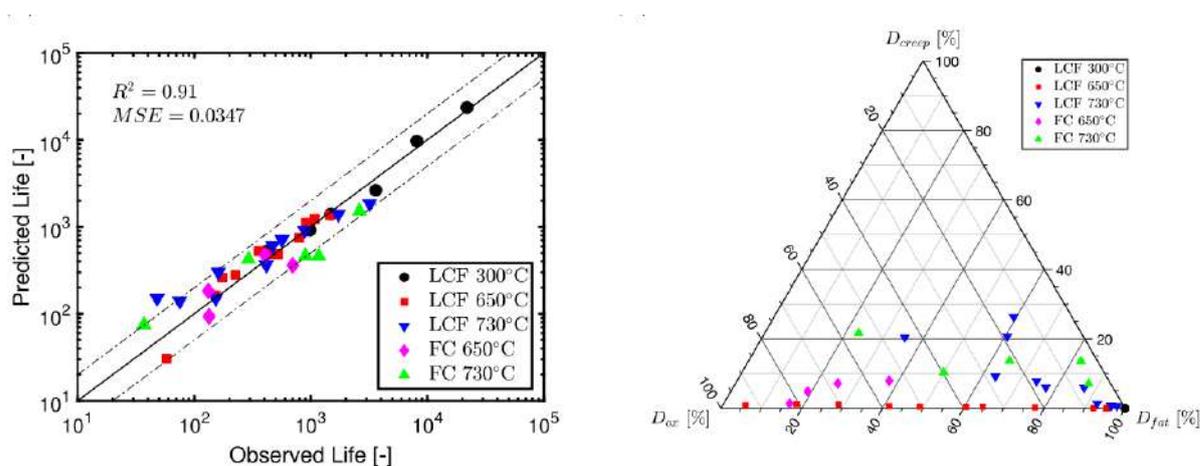


Рисунок 1.8 – Оценка качества модели (слева) и распределение значимости параметров повреждения для образцов из Inconel 718, испытанных на малоцикловую усталость

1.2. Асимметрия цикла нагружения

Коэффициент асимметрии цикла

Испытания стандартных образцов на МЦУ проводят при «мягком» и «жестком» циклах нагружения. При «мягком» цикле напряжение контролируют и сохраняют постоянным, а деформации могут меняться в течение испытания. При «жестком» же цикле, наоборот, – контролируют деформацию, а напряжения изменяются. Параметрами нагружения для таких испытаний являются максимальное или минимальное напряжения или деформации цикла, через которые можно получить другие параметры нагружения – среднее напряжение или деформацию цикла и амплитуду напряжения или деформации цикла [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2; \quad \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2; \\ \varepsilon_m &= (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})/2; \quad \varepsilon_a = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2,\end{aligned}\quad (1.6)$$

где σ_m и ε_m – средние напряжение и деформация цикла соответственно; σ_a и ε_a – амплитудные напряжение и деформация цикла соответственно; σ_{\min} и ε_{\min} – минимальные напряжение и деформация цикла соответственно; σ_{\max} и ε_{\max} – максимальные напряжение и деформация цикла соответственно.

При проведении испытаний для удобства расчетов помимо вышеперечисленных параметров цикла используют такую характеристику, как коэффициент асимметрии цикла, т. е. отношение минимального значения деформации (или напряжения) цикла к максимальному:

$$R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}; \quad R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max}, \quad (1.7)$$

где R_σ и R_ε – коэффициенты асимметрии, наиболее распространенные из которых $R = -1$ (симметричный цикл), $R = 0$ (отнулевой цикл) и $R = 0,5$.

Асимметричное нагружение в деталях газотурбинных двигателей

При эксплуатации у разных наиболее нагруженных элементов ГТД коэффициент асимметрии может отличаться и меняться как от полета к полету, так и на протяжении одного полета. Поскольку изменение коэффициента асимметрии по-разному влияет на изменение характеристик усталости для разных материалов, определение зависимости характеристик усталости от коэффициента асимметрии цикла (или от среднего напряжения цикла) является актуальной задачей.

На рисунке 1.9 Приведен пример изменения нагрузки в течение полетного цикла. Весь полетный цикл разбивается на подциклы с разными коэффициентами асимметрии, а далее повреждения от каждого подцикла суммируются с использованием метода линейного суммирования повреждений или другого, более подходящего для конкретных условий. Чтобы пользоваться таким расчетом, нужно знать зависимость характеристик усталости от асимметрии цикла.

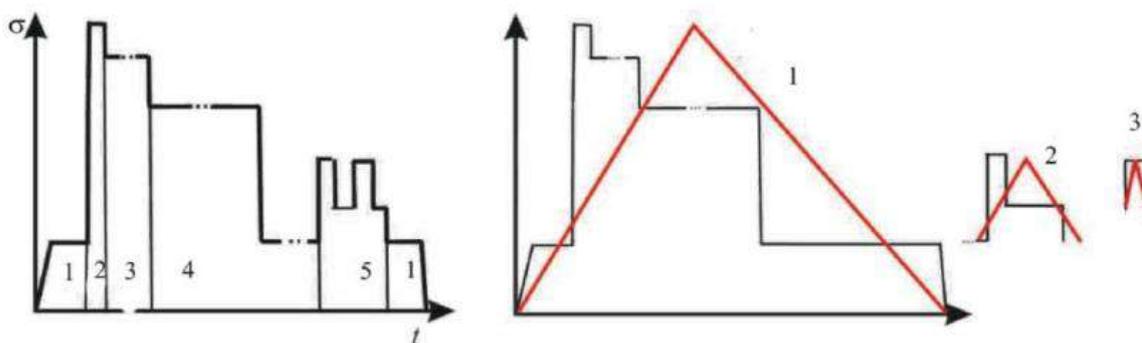


Рисунок 1.9 – Разбиение полетного цикла на подциклы с разной асимметрией [69]

Методы учета асимметрии цикла нагружения

Свойства выносливости материала обычно определяются на основе испытаний с использованием симметричного цикла напряжений (коэффициент асимметрии $R = -1$) с постоянной амплитудой. Существуют эмпирические методы учета среднего напряжения цикла. Для учета влияния коэффициента асимметрии используют зависимости Гудмана, Гербера и Содерберга [70-72]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} = 1 \quad (1.8)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2 = 1 \quad (1.9)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} = 1, \quad (1.10)$$

где σ_b – предел прочности, σ_T – условный предел текучести, σ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле. Визуальное представление данных моделей показано на рисунке 1.3.

Общая тенденция, определяемая соотношением Гудмана, заключается в уменьшении усталостной долговечности с увеличением среднего напряжения для данного уровня приложенного напряжения. Можно построить график зависимости для определения безопасной циклической нагрузки детали; если координата, заданная средним напряжением и приложенным напряжением, лежит под кривой, то деталь не разрушится. Гербер использовал параболическую модель, а Гудман использовал более консервативную прямую линию.

По оси ординат откладывают значение амплитудного напряжения σ_a , а по оси абсцисс – значение среднего напряжения σ_m предельного цикла. Каждая пара напряжений на диаграмме предельных амплитуд σ_a и σ_m определяет соответствующий предельный цикл (максимальное напряжение σ_{max} равно пределу выносливости цикла σ_R).

Учесть влияние асимметрии цикла можно как с использованием диаграммы предельных амплитуд, так и другими методами, среди которых наиболее широко известны модели Смитта-Уотсона-Топпера [73-74], модели Квофи [75], Марина [76], Уокера [77]. Применимость этих моделей к обобщению результатов испытаний на малоцикловую усталость сплавов исследована в главе 5.

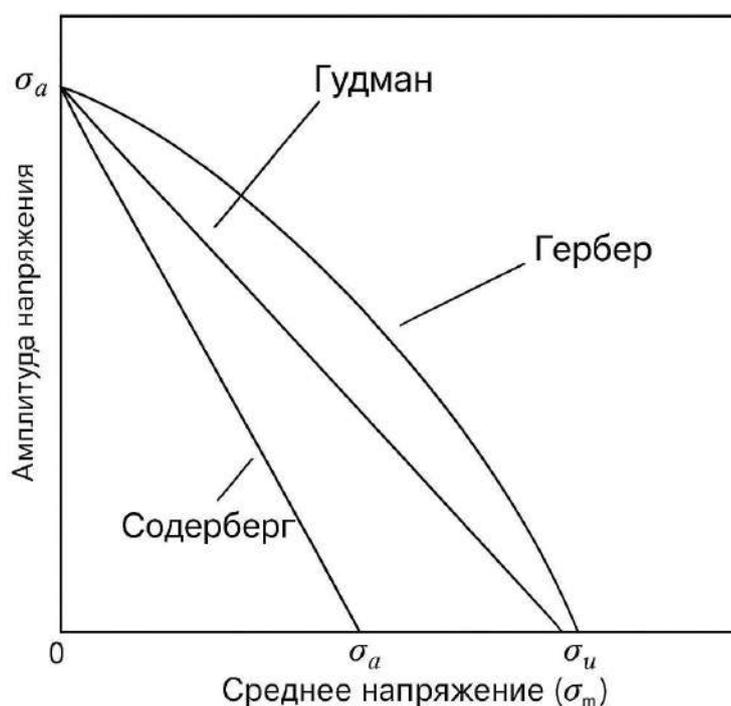


Рисунок 1.10. – Модели Гудмана, Гербера и Содерберга в графическом представлении

Обзор работ, посвященных влиянию асимметрии цикла нагружения на сопротивление малоциклового усталости

Выбору корректного метода учета среднего напряжения или средней деформации в цикле для оценки долговечности посвящено большое количество работ, в которых исследуют применимость широко известных моделей к оценке долговечности конкретного сплава или класса сплавов, а также предлагают собственные модели, часто являющиеся модификациями предложенных ранее [78-86].

Так, в работе [79] предложена модель на основе уравнения Уокера для оценки долговечности конструкционных сплавов при «жестком» нагружении при произвольной асимметрии цикла:

$$\varepsilon_w = AN_f^b = \Delta\varepsilon \left(\frac{1}{1-R_\varepsilon} \right)^{1-w_\varepsilon}; \quad (1.11)$$

$$\lg N_f = -\frac{1}{b} \lg A + \frac{1}{b} \lg \Delta\varepsilon + \frac{1-w_\varepsilon}{b} \lg \left(\frac{1}{1-R_\varepsilon} \right)$$

где N_f – долговечность, w_ε , A и b – регрессионные константы материала, $\Delta\varepsilon$ – размах деформации в цикле, R_ε – коэффициент асимметрии цикла. На рисунке 1.11 приведены полученные кривые усталости для одного из исследуемых сплавов.

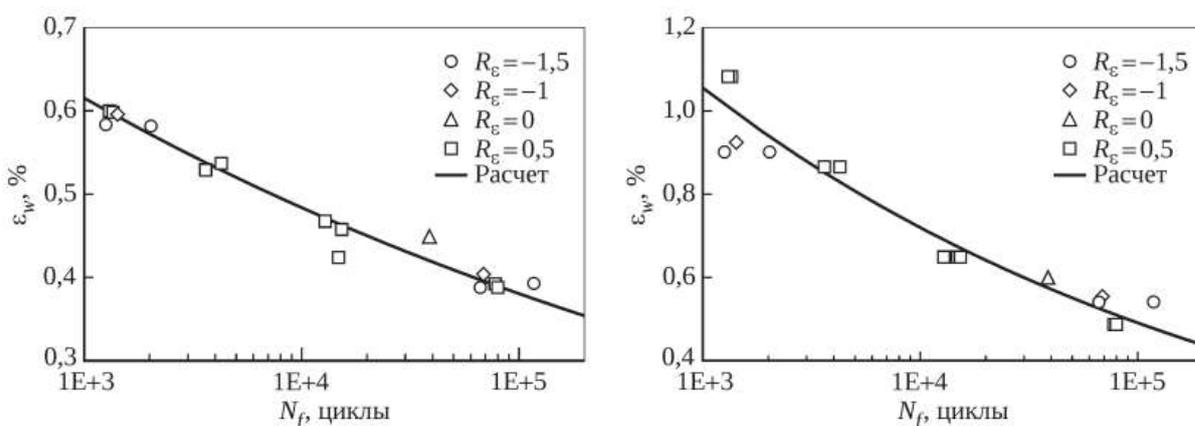


Рисунок 1.12 – Построенные с использованием модели Уокера (слева) и предложенной автором модели (справа) обобщенные кривые усталости для образцов из сплава ЭИ698-ВД, испытанных при 550°C при разных коэффициентах асимметрии цикла.

Работа [84] посвящена малоциклового усталости сплава 2124-T851 при симметричном и асимметричном нагружении при контроле деформации в цикле. Испытания проведены при коэффициентах асимметрии $R_\varepsilon = -1$, $R_\varepsilon = -0.06$, $R_\varepsilon = 0.06$, $R_\varepsilon = 0.5$. На рисунке 1.13 представлена эволюция петель упруго-пластического гистерезиса.

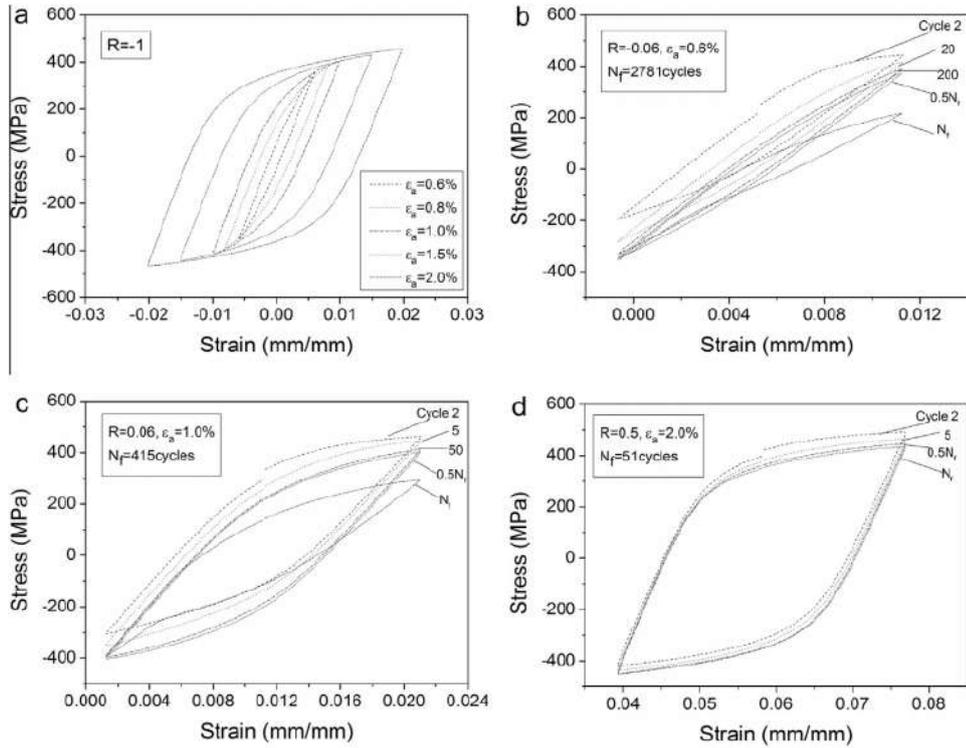


Рисунок 1.13 – петли упруго-пластического гистерезиса 2124-T851 при различной асимметрии цикла

Авторы исследовали зависимость характера изменения (релаксации) среднего напряжения цикла от коэффициента асимметрии, как показано на рисунке 1.14.

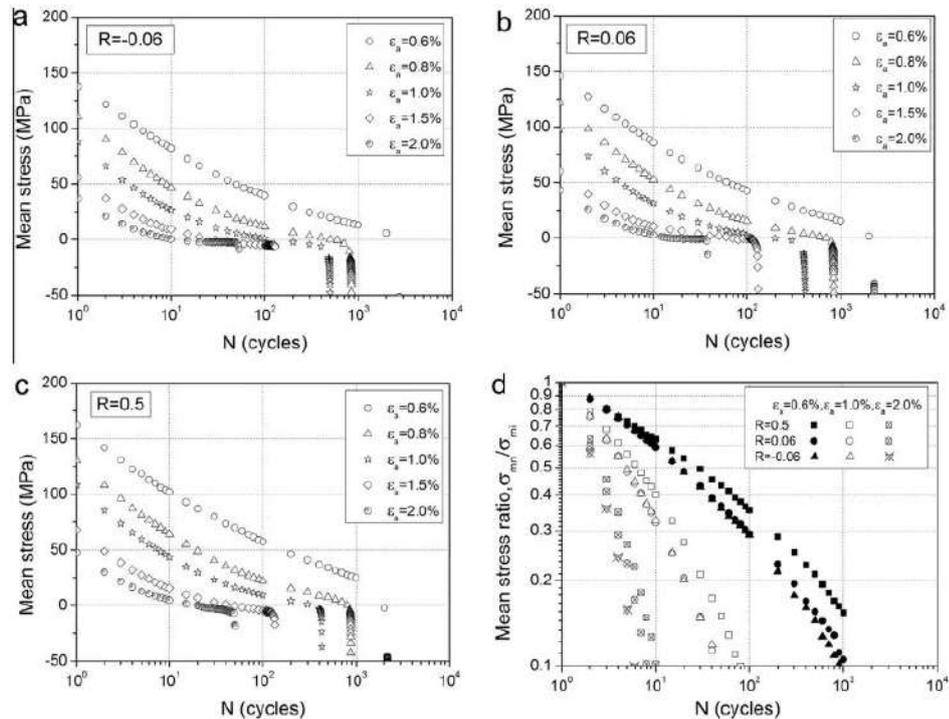


Рисунок 1.14 – изменение среднего напряжения цикла при разных коэффициентах асимметрии и амплитудах деформации

В результате проведенного исследования авторы предложили модель для оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла на основе модели Морроу. Модификация заключается в том, что был добавлен дополнительный параметр, характеризующий характер изменения среднего напряжения, тогда как модель Морроу не учитывает это. На рисунке 1.15 представлено сопоставления качества предложенной модели и модели Морроу.

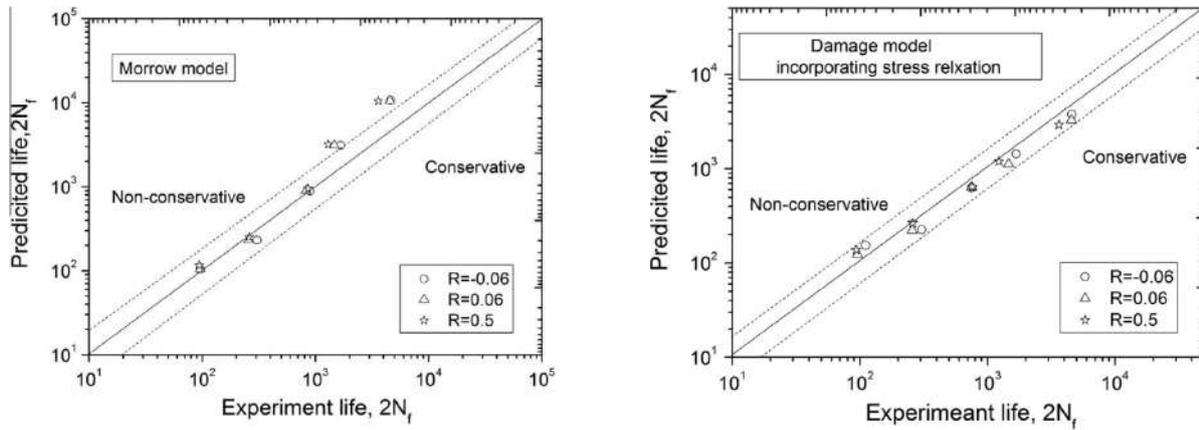


Рисунок 1.15 – Сопоставление качества моделей Морроу (слева) и предложенной авторами модели

В работе [87] исследована малоцикловая усталость никелевого сплава при различных коэффициентах асимметрии цикла при «жестком» нагружении. Исследован вопрос применимости известных моделей для обобщения результатов испытаний на случай произвольного коэффициента асимметрии: модели Смита-Уотсона-Топпера, Квофи, Гудмана, Уокера и др. (рисунок 1.16).

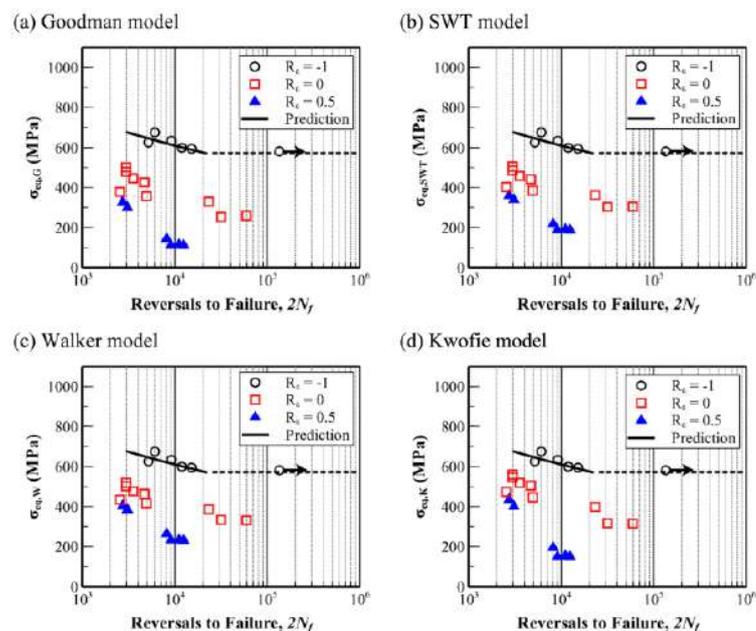


Рисунок 1.16 – Применимость моделей для обобщения результатов испытаний, проведенных при разных коэффициентах асимметрии

Авторами предложена модель на основе энергетического подхода, параметр повреждения которой зависит от поглощенной образцом энергии при упруго-пластическом деформировании. Продемонстрирована высокая сходимость результатов (рисунок 1.17).

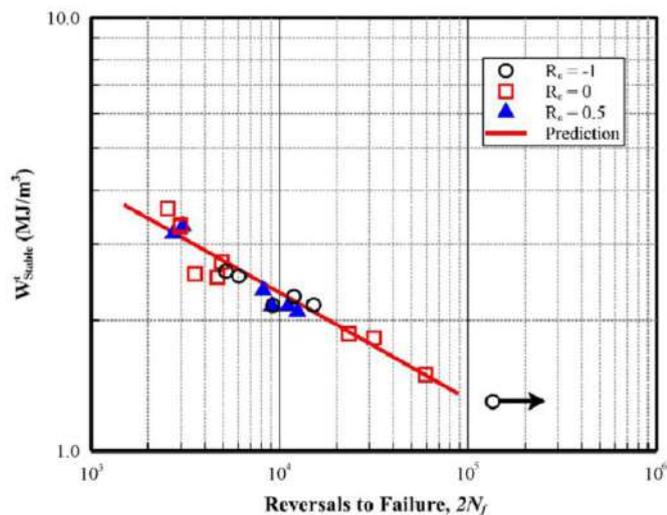


Рисунок 1.17 – зависимость долговечности от предложенного авторами энергетического параметра

1.3. «Мягкое» и «жесткое» нагружение

Особенности «мягкого» и «жесткого» нагружения

Откликом на циклические нагрузки является петля механического гистерезиса (рисунок 1.18). Ширина и форма петли гистерезиса характеризуют состояние материала на каждом цикле усталостного нагружения. Изменение характеристик петли гистерезиса и кривых циклического деформирования характеризуют способность материала сопротивляться циклическому нагружению. Если с возрастанием количества циклов характеристики не изменяются, устанавливается стабильное состояние материала, материал считают циклически стабильным. При сужении петли гистерезиса и расположении кривой циклического деформирования выше диаграммы статического деформирования (рисунок 1.19 – материал циклически упрочняющийся). Расширение петли при мягком нагружении, снижение σ_a и модуля упругости E при жестком нагружении, расположение кривой циклического деформирования ниже диаграммы статического деформирования - характеризуют циклически разупрочняющийся материал. Существуют и циклически нестабильные материалы, у которых циклическое разупрочнение, упрочнение и стабилизация существуют, взаимодействуя и сменяя друг друга, как упругая и пластическая деформации при «жестком» нагружении [89-90].

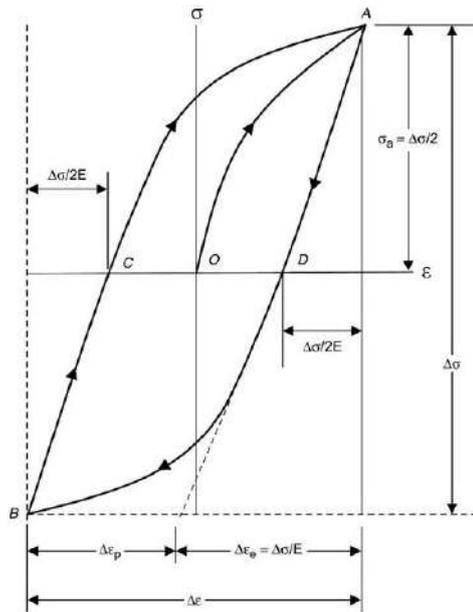


Рисунок 1.18 – петля упруго-пластического гистерезиса

На практике и «мягкое» ($\Delta\sigma = 2\sigma_0 = \text{const}$) и «жесткое» ($\Delta\varepsilon = 2\varepsilon_0 = \text{const}$) нагружение с увеличением количества циклов вызывает изменение ширины и формы петли гистерезиса, как показано на рисунке 1.19. При «мягком» нагружении упругопластическая (полная) деформация $\Delta\varepsilon$ изменяется, а при «жестком» нагружении нет. При «жестком» нагружении пластическая и упругая деформация могут только переходить одна в другую, тогда как при «мягком» нагружении к процессу перехода прибавляется процесс циклической ползучести. «Жесткое» нагружение обладает меньшим количеством воздействующих на материал параметров и, благодаря этому, испытания имеют меньший разброс результатов.

Когда петля замкнута, оба вида нагружения («мягкое» и «жесткое») производят в материале образца знакопеременное пластическое деформирование с размахом, равным ширине петли $\Delta\varepsilon_p$. Если этот основной повреждающий материал фактор – знакопеременная пластическая деформация – одинакова и с возрастанием количества циклов не изменяется, «мягкое» и «жесткое» нагружение эквивалентны по степени воздействия на циклически стабильный материал образца.

«Мягкое» нагружение – это нагружение образца силой, величина которой является функцией от времени испытания. К образцу по определенной зависимости от времени прикладывают силу и регистрируют возникающую от силы и времени деформацию. «Мягкое» нагружение в природе и технике реализуется при воздействии ветровых нагрузок, потоков воды, веса конструкции, силовых нагрузок. Энергетической особенностью «мягкого» нагружения является быстрое неуправляемое увеличение энергии, поглощаемой образцом, при его пластическом деформировании. Исторически сложилось так, что первые механические

испытания проводили при «мягком» нагружении. Затем стали регистрировать зависимость напряжения от деформации и перешли к «жесткому» нагружению [89-90].

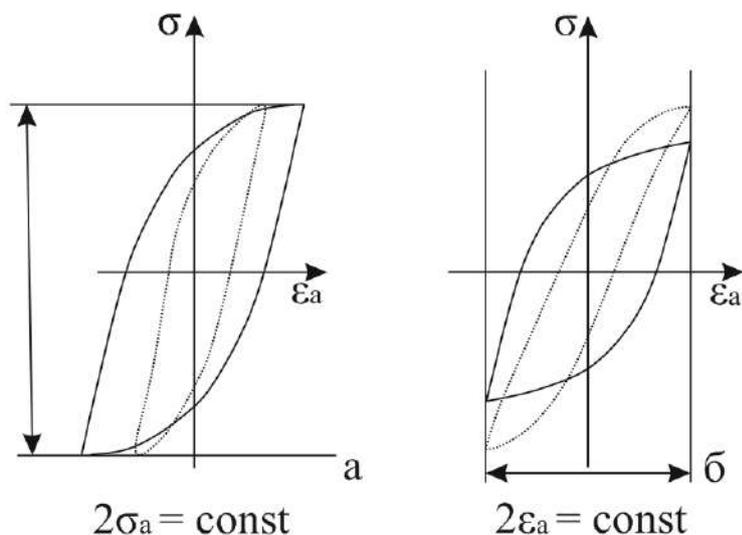


Рисунок 1.19 – петли упруго-пластического гистерезиса при «мягком» (слева) и «жестком» (справа) циклах нагружения

При «жестком» нагружении во времени деформируют образец (задают его деформацию ϵ), а регистрируют соответствующее данной деформации напряжение σ . Энергия, воспринимаемая образцом, практически целиком формируется процессами развития деформаций образца, и его силовой отклик чутко реагирует на изменение этой энергии. Жесткое нагружение требует наличия жесткой силовой цепочки «образец – испытательная машина» и проведения испытания при контроле скорости деформирования рабочей части образца ϵ с помощью закрепленного на рабочей части датчика деформации.

«Мягкое» и «жесткое» нагружение в нормативных документах

Отечественным нормативным документом, регламентирующим требования к проведению испытаний на усталость, является ГОСТ 25.502 [91]. Стандарт распространяется и на малоцикловую, и на многоцикловую усталость. Для малоцикловой усталости не указано, какой из видов нагружения является более предпочтительным – при контроле нагрузки или деформации в цикле. Требования к записи деформации при «мягком» цикле также отсутствуют.

Основные зарубежные стандарты, регламентирующие испытания на малоцикловую усталость, – ASTM E606 [92], ASTM E466 [93], ISO 12106 [94]. ASTM E606 и ISO 12106 допускают только «жесткое» нагружение при испытаниях на малоцикловую усталость. ASTM E466 регламентирует все испытания на усталость при контроле нагрузки, однако применяется обычно для многоцикловой усталости и не содержит требований и рекомендаций по записи деформации.

Требования к испытаниям на малоцикловую усталость при проведении специальной квалификации материалов газотурбинных двигателей устанавливает РЦ АП-33 [95]. В нем «жесткое» нагружение при испытаниях на малоцикловую усталость приводится как основное, а «мягкое» – как факультативное. Рекомендации по записи деформации при «мягком» нагружении тоже отсутствуют.

Таким образом, в нормативных документах нет требований к записи деформации при испытаниях на малоцикловую усталость при «мягком» нагружении. В связи с этим испытания при «мягком» цикле с записью деформации редки, так как проводятся только в специальных исследовательских целях, и представляют ценность.

Обзор работ, посвященных малоцикловой усталости при «мягком» и «жестком» нагружении

Зарубежные исследователи проводят сравнение циклического деформирования конструкционных сплавов, испытанных на МЦУ при контроле напряжения и деформации в цикле. Объектом исследования обычно выступают коэффициент упрочнения или разупрочнения и его зависимость от уровня нагружения; накопление односторонних деформаций или циклическая ползучесть; динамика развития пластических деформаций в цикле; исследование прогрессирующей асимметрии по напряжениям и деформациям; исследование кинетики развития трещин усталости; сопоставление кривых усталости, полученных при разных режимах нагружения. Также исследователи предлагают модели, позволяющие обобщить испытания при контроле деформации и напряжения с помощью введения некоторых параметров повреждения [84-96].

Например, работа [96] посвящена сопоставлению «мягкого» и «жесткого» малоциклового нагружения стали $MarBN$. Испытания проведены при симметричном цикле нагружения. Сопоставлены характеры изменения амплитуд неконтролируемых параметров нагружения (рисунок 1.20), изменение пластической деформации в цикле (рисунок 1.21).

Для «жесткого» цикла исследован характер изменения среднего напряжения цикла, а для «мягкого» – накопление деформации циклической ползучести (рисунок 1.22).

Проведен фрактографический анализ, в результате которого выявлены характерные особенности механизма разрушения при «мягком» и «жестком» циклах (рисунок 1.23). На основе проведенных исследований авторами предложен способ объединения результатов испытаний в одну выборку с использованием эффективного размаха деформации в модели Мэнсона-Коффина:

$$\Delta \varepsilon_{eff} = \Delta \varepsilon + \frac{\sigma_{min}}{E}, \varepsilon_r < 0.5\%$$

$$\Delta \varepsilon_{eff} = \Delta \varepsilon, \varepsilon_r \geq 0.5\%$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (1.12)$$

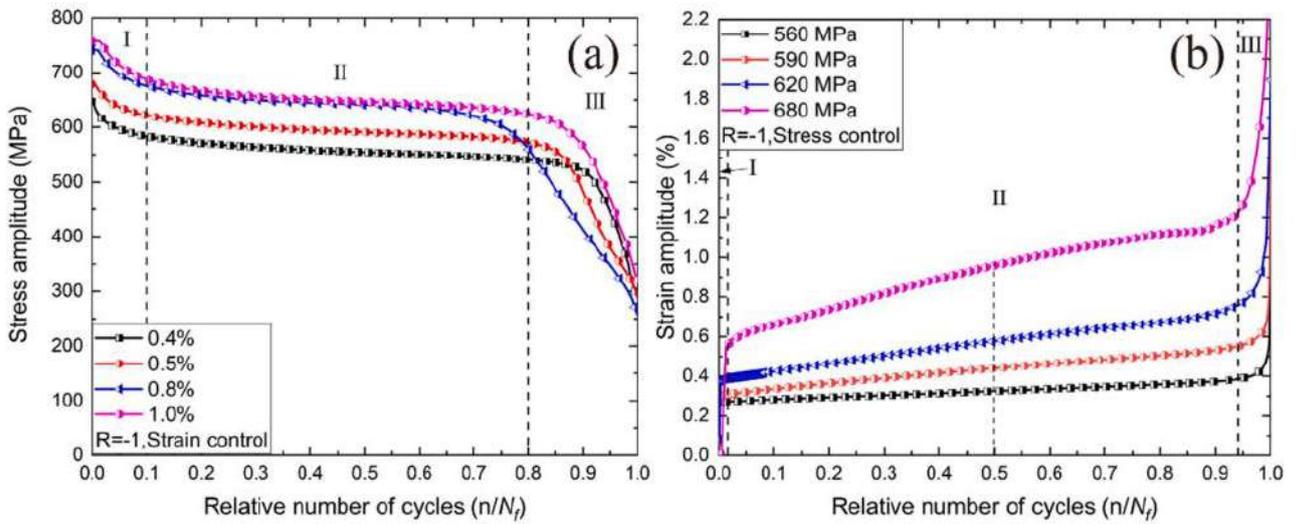


Рисунок 1.20 – изменение амплитуды неконтролируемого параметра в процессе испытания – напряжения при «мягком цикле (слева) и деформации при «жестком» цикле (справа)

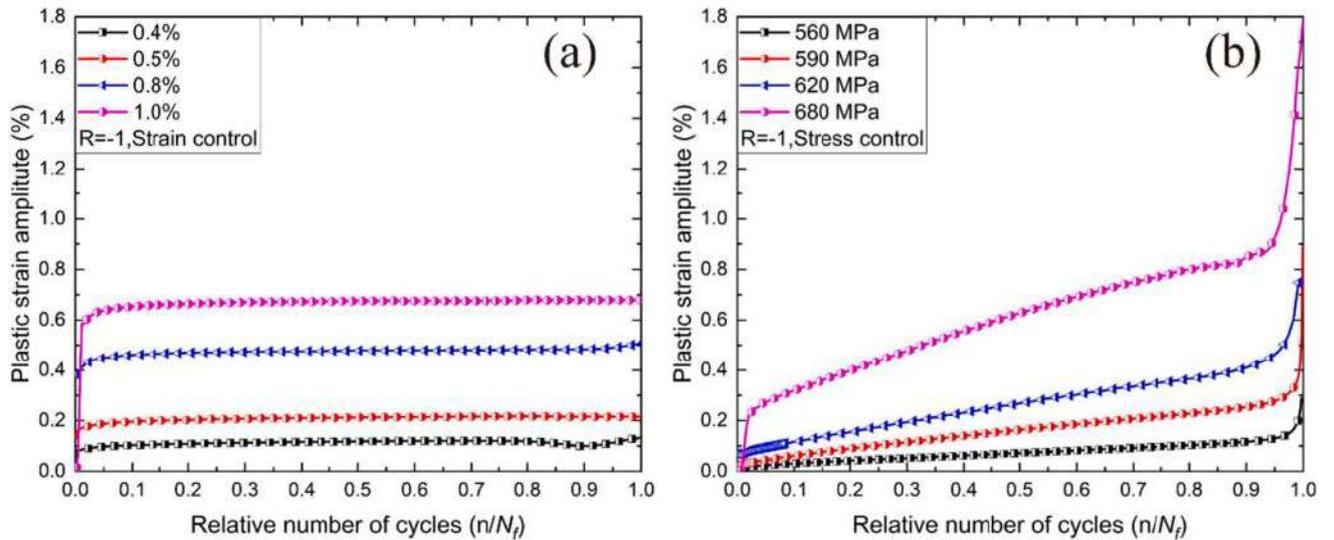


Рисунок 1.21 – изменение пластической деформации в процессе испытания при «жестком» (слева) и «мягком» (справа) нагружении

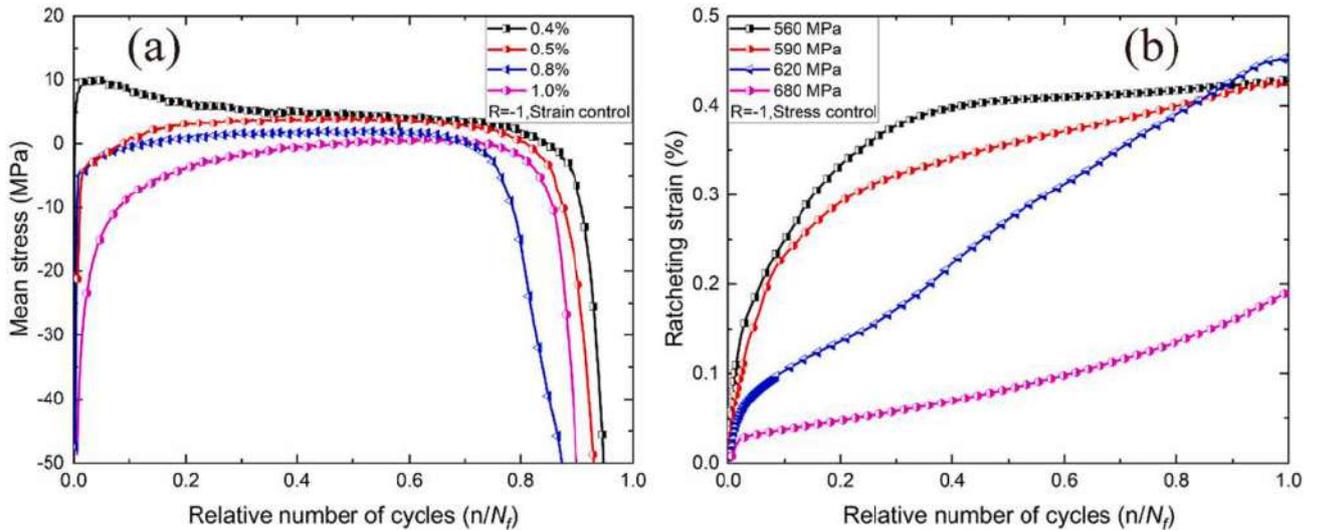


Рисунок 1.22 – изменение среднего напряжения при «жестком» цикле (слева) и накопление деформации ползучести при «мягком» цикле (справа)

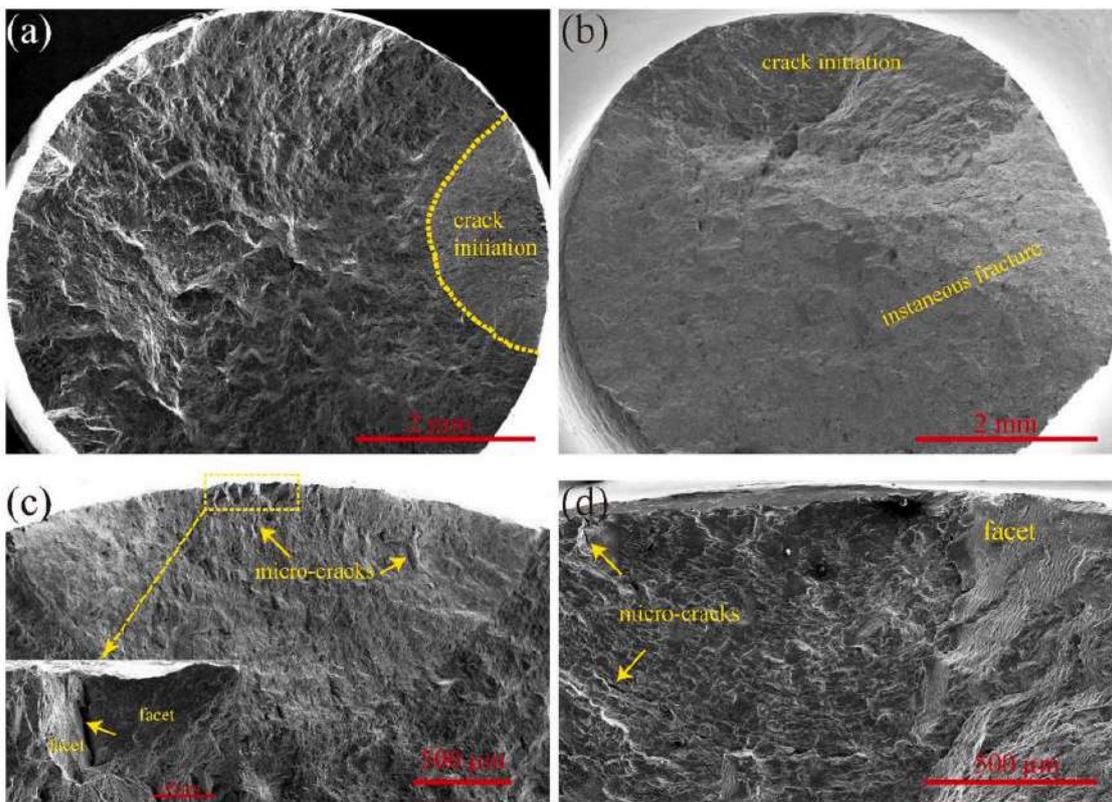


Рисунок 1.23 – фрактографический анализ при «жестком» цикле (слева) и при «мягком» цикле (справа)

1.4. Заключение по первой главе

В разделе «Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов» приведены общие сведения о проблеме разрушения деталей от малоцикловой усталости, приведена

информация о применении жаропрочных никелевых сплавов в деталях, подверженных малоциклового усталости, представлены определяющие соотношения малоциклового усталости: уравнения, связывающие долговечность и деформацию в цикле; уравнение, связывающее деформацию и напряжения при циклическом нагружении.

В разделе «асимметрия цикла нагружения» приведены причины наличия асимметрии цикла в деталях ГТД, а также представлены методы учета асимметрии цикла, в том числе построение диаграммы предельных амплитуд.

В разделе, посвященном «мягкому» и «жесткому» нагружению, представлены основные отличительные особенности проведения испытаний на малоцикловую усталость при контроле нагрузки и деформации в цикле, а также приведены выдержки из нормативных документов о выборе режима нагружения.

Кроме того, в каждом из этих трех разделов приведены литературные обзоры по соответствующей теме. Рассмотрены особенности «мягкого» и «жесткого» нагружения. Отмечена публикационная активность в ведущих журналах по работам связанным с настоящей темой (малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов, влияние асимметрии цикла на малоцикловую усталость, сопоставление результатов испытаний на малоцикловую усталость, проведенных при контроле нагрузки и деформации в цикле), что подтверждает актуальность исследования.

В результате выполнения литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертации является выявление закономерностей изменения характеристик малоциклового усталости в зависимости от параметров нагружения в условиях контролируемых деформации и напряжения жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР.

Задачи диссертационной работы:

- исследовать влияние асимметрии цикла и температуры на сопротивление малоциклового усталости образцов ВЖ175 и ВКНА-1ВР в условиях контролируемых деформации и напряжения («мягкого» и «жесткого» нагружения);
- установить связь между механизмами разрушения и параметрами нагружения образцов сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;
- установить зависимости между параметрами упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175;
- разработать метод оценки долговечности деталей из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

Жаропрочный никелевый сплав ВКНА-1ВР

ВКНА-1ВР – литейный жаропрочный интерметаллидный сплав на основе легированного соединения Ni_3Al . Сплав используют для изготовления сопловых лопаток, створок-проставок, элементов камеры сгорания и других деталей горячего тракта газотурбинного двигателя, работающих без защитных жаростойких покрытий в интервале температур от 850 до 1200 °С. Образцы для испытаний на малоцикловую усталость изготовлены из отливок с равноосной структурой, изготовленных методом точного литья в вакууме. Исследованию свойств этого сплава посвящен ряд публикаций [109-113]. В таблице 2 приведены характеристики кратковременной прочности ВКНА-1ВР.

Таблица 2.1. Механические свойства ВКНА-1Вр

T, °C	E, ГПа	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Ψ , %
20	198	580	360	5,0	8,3
850	143	680	616	4,1	5,4
1050	126	405	360	4,5	6,5

На рисунке 2.1 представлена микроструктура ВКНА-1ВР. Она имеет дендритно-ячеистое строение. В междендритных областях расположены равномерные участки эвтектики ($\gamma'+\beta$)-фазы, на границе γ -фазы выделяется вторичная γ' -фаза. Оси дендритов состоят из интерметаллида Ni_3Al , разделенного прослойками твердого раствора на основе Ni.

Проведена выплавка сплава ВКНА-1ВР. Сплав выплавляли с использованием свежих шихтовых материалов. Перед запуском в производство шихтовые материалы просушивали естественной сушкой не менее суток и очищали вручную от упаковочных и инородных материалов. Никель, вольфрам, молибден, хром, алюминий, титан, углерод просушивали в электропечи типа ПВП-1000/12,5 при температуре от 250 до 300°С в течение времени от 2 до 3 ч. Для получения требуемой навески и более плотной загрузки в тигель чушки алюминия измельчали на куски массой не более 1 кг на аллигаторных ножницах, чушки кобальта перед прокаткой подвергали предварительному нагреву в электропечи типа ПСКО 1200/600 до температуры от 900 до 950°С и выдерживали при этой температуре в течение 1 ч, после прокатки на лист толщиной от 5 до 10 мм измельчали на гильотинных ножницах, углерод измельчали на гидравлическом прессе и вручную до получения гранул размером от 5 до 15 мм. Часть шихтовых материалов загружали в тигель как можно плотнее, оставшуюся часть загружали после расплавления шихтовых материалов. После загрузки всех шихтовых

материалов брали пробу для экспресс-анализа легирующих элементов. В таблице 2.1 показано содержание легирующих элементов и примесей сплава ВКНА-1ВР в пробе экспресс-анализа.

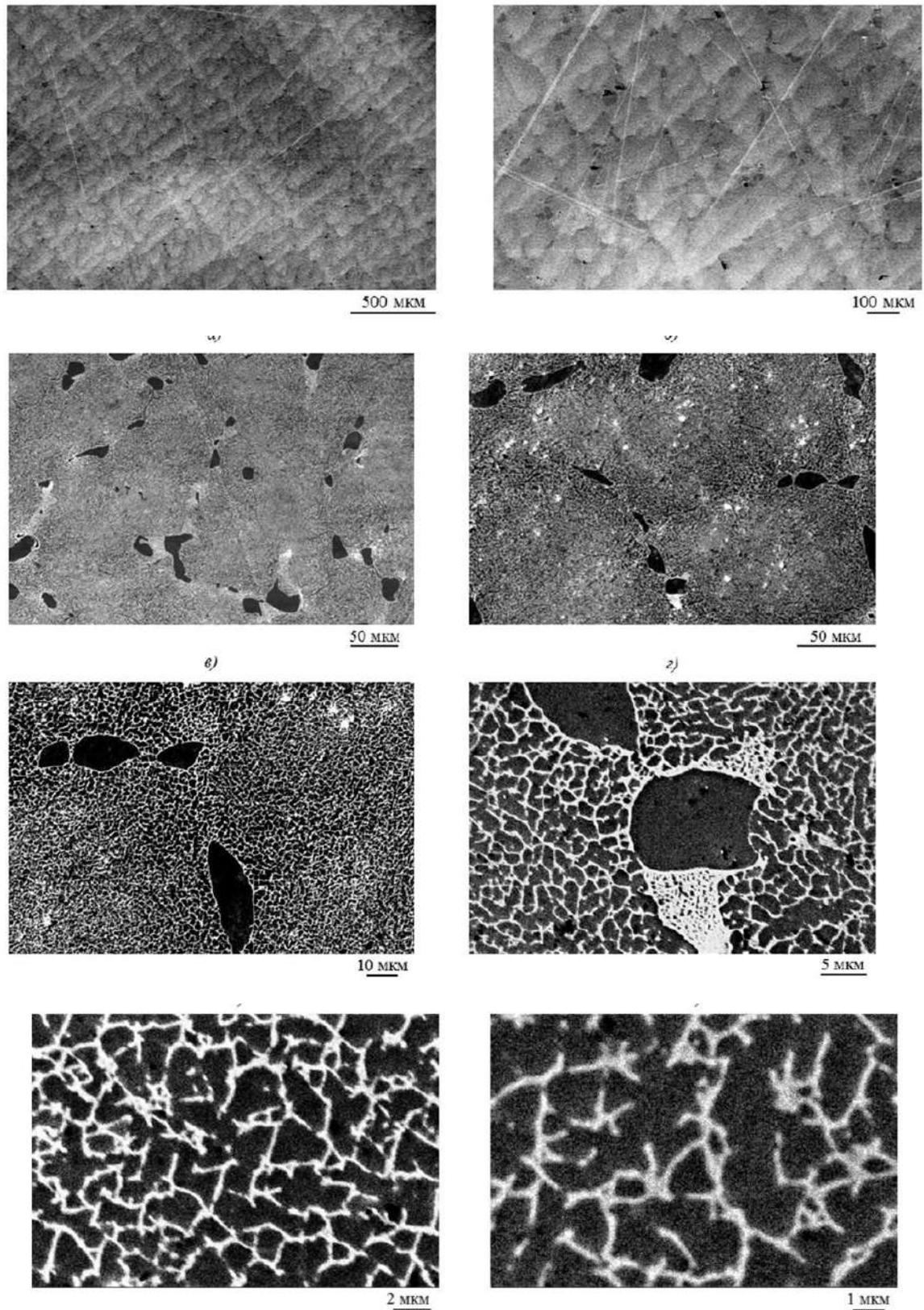


Рисунок 2.1 – микроструктура ВКНА-1ВР

Таблица 2.2 – Содержание легирующих элементов и примесей сплава ВКНА-1ВР

№ плавки	C	Al	Cr	W	Mo	Ti	Hf	Fe	Si
13ЯР-81В	0,13	8,47	5,46	3,31	3,52	1,35	0,37	0,33	0,03
Расчет	0,14	8,4	5,5	3,0	3,5	1,5	0,5	-	-
По ТУ	0,12- 0,15	8,0-9,0	5,0-6,0	2,0-4,0	2,5-4,5	1,0-2,0	0,4-0,6	0,5	0,4

Как видно из таблицы 2.1, содержание углерода, хрома и титана находится ближе к нижнему допустимому пределу по ТУ, а содержание гафния ниже нижнего предела ТУ. Это связано с тем, что упругость пара этих элементов при температурах плавки высокая и некоторое количество этих элементов во время плавки испаряется. Поэтому после проведения экспресс-анализа проводили дошихтовку сплава углеродом в количестве 0,033 кг, хромом в количестве 0,165 кг, титаном в количестве 0,500 кг и лигатурой никель-гафний в количестве 0,370 кг до оптимального состава. Перед сливом проводили рафинирование расплава кальцием в виде лигатуры никель-кальций и лантаном в виде лигатуры никель-лантан. Разливку металла осуществляли через фильтр, установленный в промежуточном ковше в стальные трубы диаметром 90 мм с утеплительными вставками. Извлечение заготовок из труб проводили на гидравлическом прессе с усилием до 100 т. С донной части литой прутковой заготовки сплава ВКНА-1ВР отрезали заготовку для полного химического анализа. Химический анализ проводили по ГОСТ 6689.1-6689.21 и МВИ 1.2.010-2009. В таблице 2.2 указан итоговый химический состав сплава ВКНА-1ВР.

Таблица 2.3 – Итоговый химический состав сплава ВКНА-1ВР (Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Каблов Е.Н., Фомин А.А. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al и изделие, выполненное из него. Патент на изобретение № 2304179. RU 2304179 C1.)

№ плавки	Массовая доля элементов, %							
	Ni	Al	Cr	W	Mo	Ti	Hf	C
13ЯР-81В	Осн.	8,40	5,36	3,29	3,55	1,52	0,52	0,13
Расчетный состав	Осн.	8,0-9,0	5,0-6,0	2,0-4,0	2,5-4,5	1,0-2,0	0,4-0,6	0,12- 0,15
По ТУ	Осн.	8,4	5,5	3,0	3,5	1,5	0,5	0,14
№ плавки	Массовая доля примесей, %							
	S	P	Sb	Fe	Vi	Sn	Pb	Si
13ЯР-81В	0,0010	0,0055	<0,00001	0,33	0,00001	0,00005	0,00007	0,03
По ТУ	≤0,005	≤0,015	≤0,003	≤0,5	≤0,0005	≤0,003	≤0,001	≤0,4

Из таблицы 2.2 СЛЕДУЕТ, что как по основным легирующим элементам, так и по примесям химический состав сплава ВКНА-1ВР полностью удовлетворяет требованиям технических условий ТУ 1-595-3-783-2004.

Из полученных слитков проведена отливка заготовок образцов сплава ВКНА-1ВР. Отливка производилась блоками, затем от блока отрезали заготовки под образцы длиной 80 мм и диаметром 18 мм.

Жаропрочный никелевый сплав ВЖ175

ВЖ175 – жаропрочный деформируемый никелевый сплав, относящийся к классу дисперсно-твердеющих и используемый преимущественно для изготовления дисков газотурбинных двигателей и установок. Он имеет сложную систему легирования (Ni-Co-Cr-W-Mo-Al-Ti-Nb-C). Упрочняется интерметаллидной γ' -фазой сложного состава $[(Ni,Co,Cr)_3(Al, Ti, Nb, Mo, W, V)]$ и морфологии: размер частиц первичной γ' -фазы составляет 2-7 мкм, вторичной и третичной, расположенных в прослойках твердого раствора, – от 10 до 700 нм. Количество упрочняющей γ' -фазы достигает 53%. Границы зерен γ -твердого раствора упрочнены мелкодисперсной карбидной (типа (Nb, Ti)C) и боридной (типа (Mo,Cr,W,Co)₃B₂) фазами. Исследованию свойств этого сплава посвящены публикации [114-117]. На рисунке 2.2 приведена микроструктура ВЖ175. Свойства кратковременной прочности приведены в таблице 2.

Таблица 2.4 Механические свойства ВЖ175-ИД

T, °C	E, ГПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Ψ , %
20	219	1630	1215	14	16
650	178	1560	1100	12	14
750	172	1215	1050	6	9

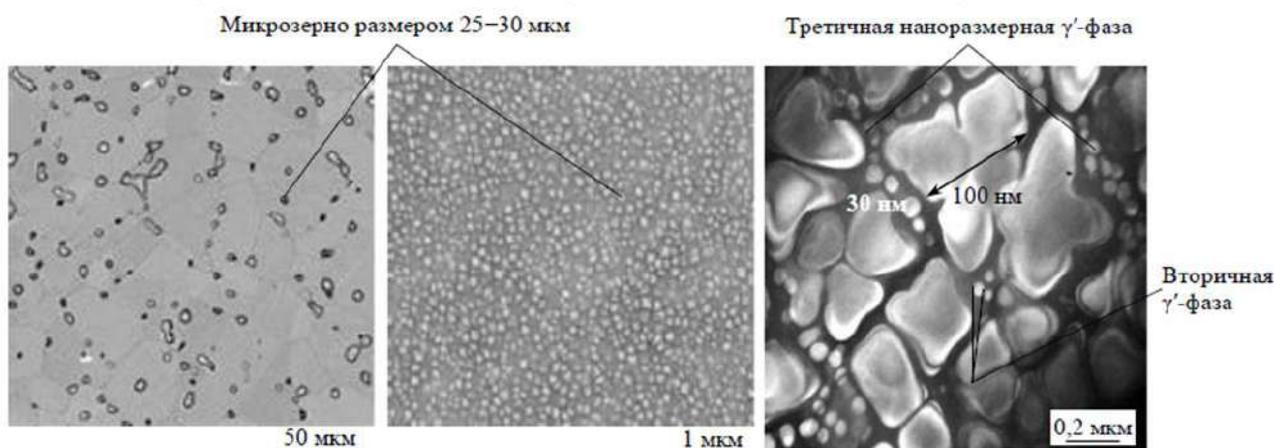


Рисунок 2.2 – микроструктура ВЖ175

Образцы для испытаний на малоцикловую усталость изготовлены из штамповки диска диаметром 600 мм. Для повышения технологической пластичности и формирования регламентированной структуры штамповок были применены режимы отжига деформированных заготовок, деформация осуществлялась при температуре двухфазной области в условиях контролируемой динамической рекристаллизации.

Для изготовления заготовок образцов для испытаний на МЦУ из сплава ВЖ175 были использованы штамповки сплава ВЖ175. Было принято решение, что для корректного сравнения результатов испытаний на МЦУ при «мягком» и «жестком» цикле целесообразно использовать образцы одинаковой геометрии. Размеры заготовок образцов 20x20x76 мм. Были разработаны схемы резки этих штамповок, позволяющие получить максимальное число заготовок. Заготовки образцов были отсортированы по месту вырезки. Заготовки, вырезанные из ступицы, использованы преимущественно при низких температурах, а из полотна и обода – при высоких и близких к максимальным рабочим температурам.

2.2. Методы исследований

Нормативные документы, регламентирующие процесс испытаний на малоцикловую усталость

В России при проведении испытаний на малоцикловую усталость руководствуются требованиями российского стандарта ГОСТ 25-502-79 основные зарубежные стандарты на и испытания на усталость – ASTM E466 и ASTM E606. Для обработки результатов испытаний используются ГОСТ 25.502, стандарты ASTM, а также рекомендательный циркуляр РЦ-АП-33-15 «Методические рекомендации по определению расчетных характеристик конструкционной прочности металлических материалов», ссылающийся на вышеперечисленные стандарты и устанавливающий правила определения расчетных значений характеристик прочности материалов конструкций авиационных двигателей для доказательства соответствия материалов требованиям авиационных правил АП-33. Помимо нормативных документов, при проведении испытанию руководствуются рекомендациями, изложенными в работах [118-120].

В ASTM E606 описываются требования к проведению испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения. В целом, в ASTM E606 требования к испытаниям на МЦУ при «жестком» цикле нагружения описываются более подробно, чем в ГОСТ 25.502.

Было проведено сравнение основных требований этих стандартов [3, 121]:

В ГОСТ 25.502 указаны размеры образца для различных диаметров рабочей части, начиная с 5 мм. В ASTM E606 указаны пропорциональные соотношения размеров образца и его диаметра. Для сравнения выберем диаметр образца 5 мм.

Из таблицы 2.5 следует, что при одинаковом диаметре рабочей части образца, ASTM E606 требует более короткую длину рабочей части, что должно обеспечивать большую устойчивость образца к потере соосности при испытаниях. Радиус перехода от рабочей части к захватной в ASTM E606 значительно больше, чем в ГОСТ 25.502, что обеспечивает меньшую концентрацию напряжений в этой зоне и обеспечивает разрушение образца в рабочей части. В ASTM E606 более жесткие требования по шероховатости рабочей части, указано конкретное значение, соответствующее нижней границе интервала в ГОСТ 25.502.

Таблица 2.5 – Сравнение размеров образца.

Сравниваемый параметр	ГОСТ 25.502	ASTM E606
d рабочей части	5 мм	5 мм
L ₀ рабочей части	25 мм	15±5 мм
R	5 мм	20±10 мм
L		100±20 мм
Точность изготовления рабочей части	Больше 7 качества (±0,006 мм)	±0,2% (±0,01 мм)
Шероховатость поверхности рабочей части, Ra	0,32-0,16	0,2
Точность измерения, рабочей части	0,01мм	0,0125мм

В отличие от ГОСТ 25.502, в ASTM E606 большое внимание уделяется изготовлению образца для испытаний. Приведены рекомендации по технологическому процессу последней стадии изготовления образца для получения минимальных остаточных напряжений, указано о необходимости продольного полирования рабочей части образца и отмечено, что на рабочей части не должно быть поперечных рисок при увеличении 20X.

Таблица 2.6 – Сравнение требований к процедуре испытания

Сравниваемый параметр	ГОСТ 25.502	ASTM E606
Погрешность нагружения в интервале 0,2-1,0 от возможности испытательной машины	0,5 Гц – ±2% 0,5-50 Гц – ±3%	1% от амплитуды
Погрешность контроля деформации	±3%	1% от амплитуды
Несоосность оси нагружения	Менее 5%	Менее 5%
Критерий завершения испытания	Трещина, количество циклов, разрушение	Тоже + метод модулей

Перепад Т по раб. части	1% на 10мм	минимальный
Отклонение Т на раб. части от заданной	до 600°C – ±6 до 900°C ±8 до 1200°C ±12	1%, т.е. 600°C – ±6 900°C ±9 1200°C ±12
Требования к машине	ГОСТ 1497	E4 E467
Калибровка	Не регламентируется	Каждые 6 мес
Выход на режим	Не регламентируется	20 циклов или 2% от базы
Количество образцов	Не менее 10 образцов	Не менее 10 образцов

Из таблицы 2.6 следует, что существенно выше требования к поддержанию амплитуды нагружения в ASTM E606. Требования к соосности оси нагружения образца идентичны. В ASTM E606 описан дополнительный критерий окончания испытания, по сравнению с ГОСТ 25.502 – метод модулей. Требования к точности поддержания температуры выше в ASTM E606, особенно при температурах ниже 600°C. В ГОСТ 25.502 не регламентируется скорость выхода на режим испытания.

Из указанного выше следует, что в ASTM E606 требования прописаны более подробно и более жестко, чем в ГОСТ 25.502, поэтому они будут взяты за основу при разработке стандарта организации на методику испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения жаропрочных сплавов для авиационных ГТД при температурах до 1100°C и разработке проекта национального стандарта на метод испытания на малоцикловую усталость металлических материалов при заданной деформации цикла нагружения.

Стандарты ГОСТ 25-502-79, ASTM E466 и ASTM E606 имеют схожую структуру и включают в себя следующие разделы:

1) Требования к образцу

Российский и американские стандарты содержат чертежи нескольких типов образцов для испытаний на малоцикловую усталость и требования к их размерам. Сопоставление требований к размерам рабочей части образца для испытаний на малоцикловую усталость представлено в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Рекомендуемые размеры рабочей части гладких цилиндрических образцов для испытаний на малоцикловую усталость.

Стандарт	Диаметр рабочей части d, мм	Длина рабочей части
ГОСТ 25-502	5-25	5d
ASTM E606	5-25	2d – 3d
ASTM E606	6,35*	3d ± d

* Возможны другие размеры, ограничения не указаны.

В отличие от ГОСТ 25.502, в ASTM E606 большое внимание уделяется изготовлению образца для испытаний. Из таблицы сравнения геометрических размеров видно, что при одинаковом диаметре рабочей части образца, ASTM E606 требует более короткую длину рабочей части, что должно обеспечивать большую устойчивость образца к потере соосности при испытаниях. Радиус перехода от рабочей части к захватной в ASTM E606 значительно больше, чем в ГОСТ 25.502, что обеспечивает меньшую концентрацию напряжений в этой зоне и обеспечивает разрушение образца в рабочей части. В ASTM E606 более жесткие требования по шероховатости рабочей части, указано конкретное значение, соответствующее нижней границе интервала в ГОСТ 25.502. В ASTM E606 также приведены рекомендации по технологическому процессу последней стадии изготовления образца для получения минимальных остаточных напряжений, указано о необходимости продольного полирования рабочей части образца и отмечено, что на рабочей части не должно быть поперечных рисок при увеличении 20X.

2) Требования к оборудованию

ГОСТ 25.502, ASTM E466 и ASTM E 606 содержат раздел «требования к оборудованию». В этом разделе имеется информация о том, каким условиям должна отвечать испытательная машина, и приводятся требования к точности испытательной техники

В таблице 2.8 приведены допустимые значения предельных отклонений параметров испытаний от заданных, установленные в рассматриваемых стандартах.

Таблица 2.8 – Точность параметров испытаний.

Стандарт	Пределы отклонения параметров испытания		
	нагрузка	деформация	температура
ГОСТ 25-502	$\pm (2-5) \%$	$\pm 3\%$	$\pm (6-12) ^\circ\text{C}$
ASTM E606	$\pm 1 \%$	$\pm 1\%$	$\pm 1^\circ\text{C}$ или $\pm 1\%$
ASTM E606	± 2	-	-

3) Требования к проведению испытаний

В стандарте E606 этот раздел включает в себя такие подразделы, как: температура, контроль испытательной машины, скорость деформации и частота нагружения, критерии разрушения. В стандарте подробно регламентируются параметры проведения испытания. В стандарте E466 имеется всего 2 подраздела: «закрепление образца» и «проверка и обеспечение соосности». В ГОСТ 25-502 раздел «проведение испытаний» структурирован иначе – в нем содержатся общие рекомендации по проведению испытаний на усталость, например, рекомендации по количеству испытываемых образцов для определения расчетных характеристик сопротивления усталости, температуре испытания, частоте прикладываемой

нагрузки. В ГОСТ 25.502 указано, что для определения предела выносливости испытывают не менее 15 образцов. Не менее трех из них должны быть испытаны близко к уровню предела выносливости, и не менее половины из них должны не разрушиться до прохождения базы, на которой определяется предел выносливости.

Также стандарты ГОСТ 25.502 и ASTM E606 включают в себя разделы, в которых указаны рекомендации по обработке результатов или аналитические зависимости, а в стандарте ASTM E 466 имеется ссылка на стандарт ASTM E467, в котором имеются рекомендации к обработке результатов испытаний.

По результатам проведенного анализа разработана методика и выпущен СТО 1-595-33-456-2014 «Методика испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения жаропрочных сплавов для авиационных ГТД», соответствующий требованиям зарубежного стандарта ASTM E606 «Стандартный метод для испытаний на усталость при контролируемой деформации». Методика предназначена для проведения испытаний на МЦУ при одноосном растяжении – сжатии образцов материала при управлении деформацией в цикле нагружения («жесткий» цикл).

В данном СТО, по сравнению с ГОСТ 25.502 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость», более подробно описаны подготовка образца: приведены рекомендации по технологическому процессу последней стадии изготовления образца для получения минимальных остаточных напряжений, указано о необходимости продольного полирования рабочей части образца и отмечено, что на рабочей части не должно быть поперечных рисок при 20-ти кратном увеличении, отмечено о необходимости замера остаточных напряжений на поверхности рабочей части образца, более подробно прописана процедура проведения испытания, более высокие требования к точности поддержания амплитуды деформации и температуры. Для проверки методики были успешно проведены испытания на МЦУ при «жестком» цикле нагружения при $T=1100^{\circ}\text{C}$ для сплава ВКНА-1ВР.

При испытаниях на малоцикловую усталость использованы гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 15 мм, соответствующие требованиям ASTM E606, как показано на рисунке 2.3.

Испытания были проведены на сервогидравлическом универсальном испытательном оборудовании. Контроль полной деформации был осуществлен с помощью высокотемпературного экстензометра с керамическими щупами. Поддержание заданной температуры испытаний осуществлялось при помощи трехзонных электрических печей.

Образцы испытывали при трех температурах для каждого сплава: 20°C , 650°C и 750°C для ВЖ175; 20°C , 850°C и 1050°C для ВКНА-1ВР. При одной температуре и одном

коэффициенте асимметрии было испытано по 15-20 образцов на нескольких уровнях амплитуд деформации или напряжения. Испытания проводились при трех коэффициентах асимметрии ($R=0, 0,5, -1$), синусоидальной форме цикла, частоте нагружения $f = 1$ Гц и для «мягкого», и для «жесткого цикла нагружения. При проведении испытаний определялось число циклов до разрушения N_r . Для испытаний при «жестком» цикле производилась регистрация напряжений в течение всего испытания, производилась запись петель гистерезиса. Схема распределения испытаний представлена на рисунке 2.4

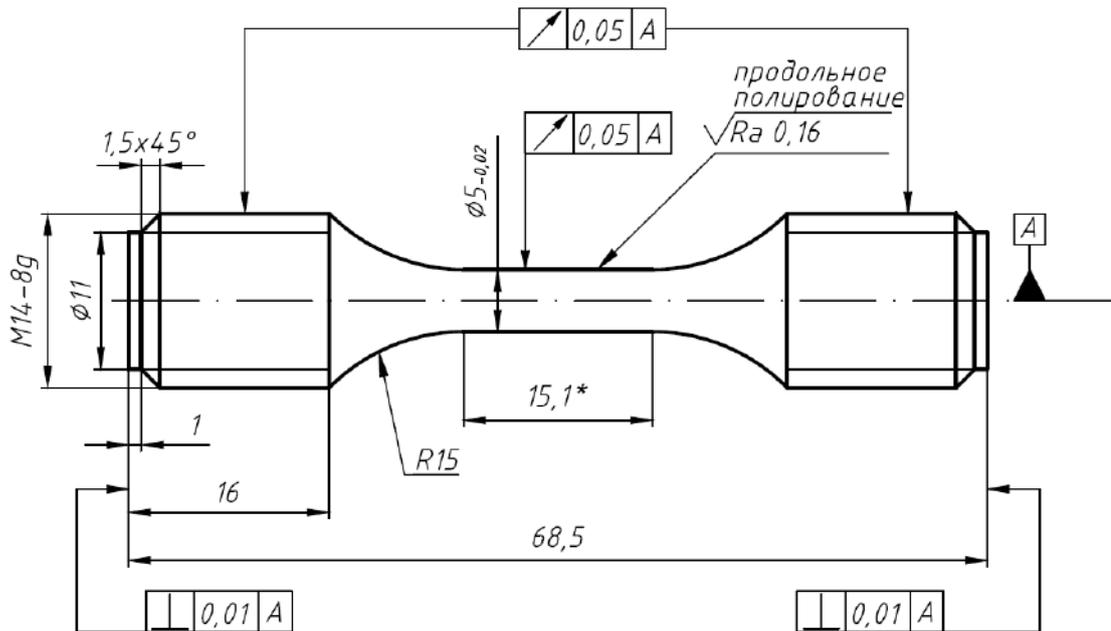
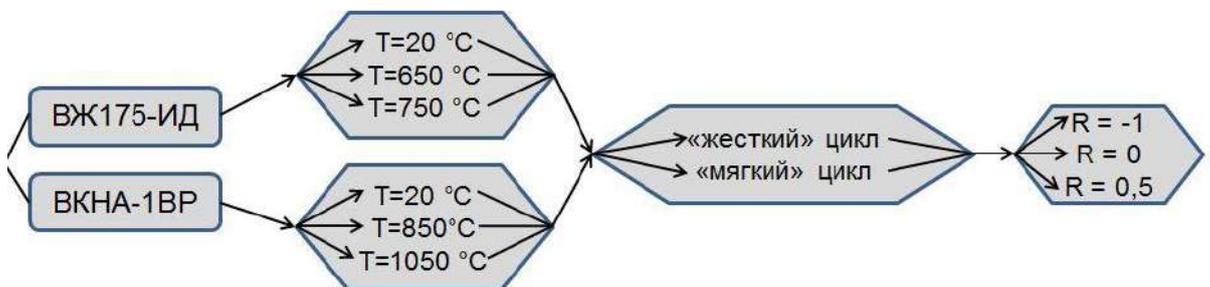


Рисунок 2.3 . Эскиз образца для испытаний на малоцикловую усталость

При «жестком» цикле нагружения управление деформацией рабочей части проводили до разрушения образца или до образования трещины в рабочей части, что фиксировалось по падению максимального напряжения в цикле нагружения на 50%. Все образцы разрушались (или образовывалась трещина) в рабочей части, что свидетельствует о корректности работы испытательной машины и качестве изготовления образцов [10].



2 сплава × 3 температуры × 2 режима нагружения × 3 коэффициента асимметрии = 36 выборки по 15-20 образцов

Рисунок 2.4 – Схема распределения испытаний по сплавам, температурам, режимам нагружения и коэффициентам асимметрии

2.3. Заключение по второй главе

В качестве объектов испытаний выбраны жаропрочные никелевые сплавы ВКНА-1ВР и ВЖ175.

ВКНА-1ВР – литейный жаропрочный интерметаллидный сплав на основе легированного соединения Ni_3Al . Сплав используют для изготовления сопловых лопаток, створок-проставок, элементов камеры сгорания и других деталей горячего тракта газотурбинного двигателя, работающих без защитных жаростойких покрытий в интервале температур от 850 до 1200 °С. Образцы для испытаний на малоцикловую усталость изготовлены из отливок с равноосной структурой, изготовленных методом точного литья в вакууме.

ВЖ175 – жаропрочный деформируемый никелевый сплав, относящийся к классу дисперсно-твердеющих и используемый преимущественно для изготовления дисков газотурбинных двигателей и установок.

Образцы испытывали при трех температурах для каждого сплава: 20°C, 650 °С и 750 °С для ВЖ175; 20°C, 850 °С и 1050 °С для ВКНА-1ВР. При одной температуре и одном коэффициенте асимметрии было испытано по 15-20 образцов на нескольких уровнях амплитуд деформации или напряжения. Испытания проводили при трех коэффициентах асимметрии цикла ($R=0, 0.5, -1$), синусоидальной форме цикла, частоте нагружения $f = 1$ Гц и для «мягкого», и для «жесткого цикла нагружения. При проведении испытаний определяли число циклов до разрушения N_p , в процессе проведения испытаний регистрировали нагрузки и деформации. Для испытаний при «жестком» цикле производилась регистрация напряжений в течение всего испытания, производилась запись петель гистерезиса.

3. ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Фрактография ВЖ175

«Жесткий» цикл нагружения

На рис. 3.1–3.3 представлены результаты изучения особенностей поверхностного рельефа, образованного в результате распространения усталостной трещины, в процессе испытаний образцов сплава ВЖ175 на МЦУ при заданной деформации [122].

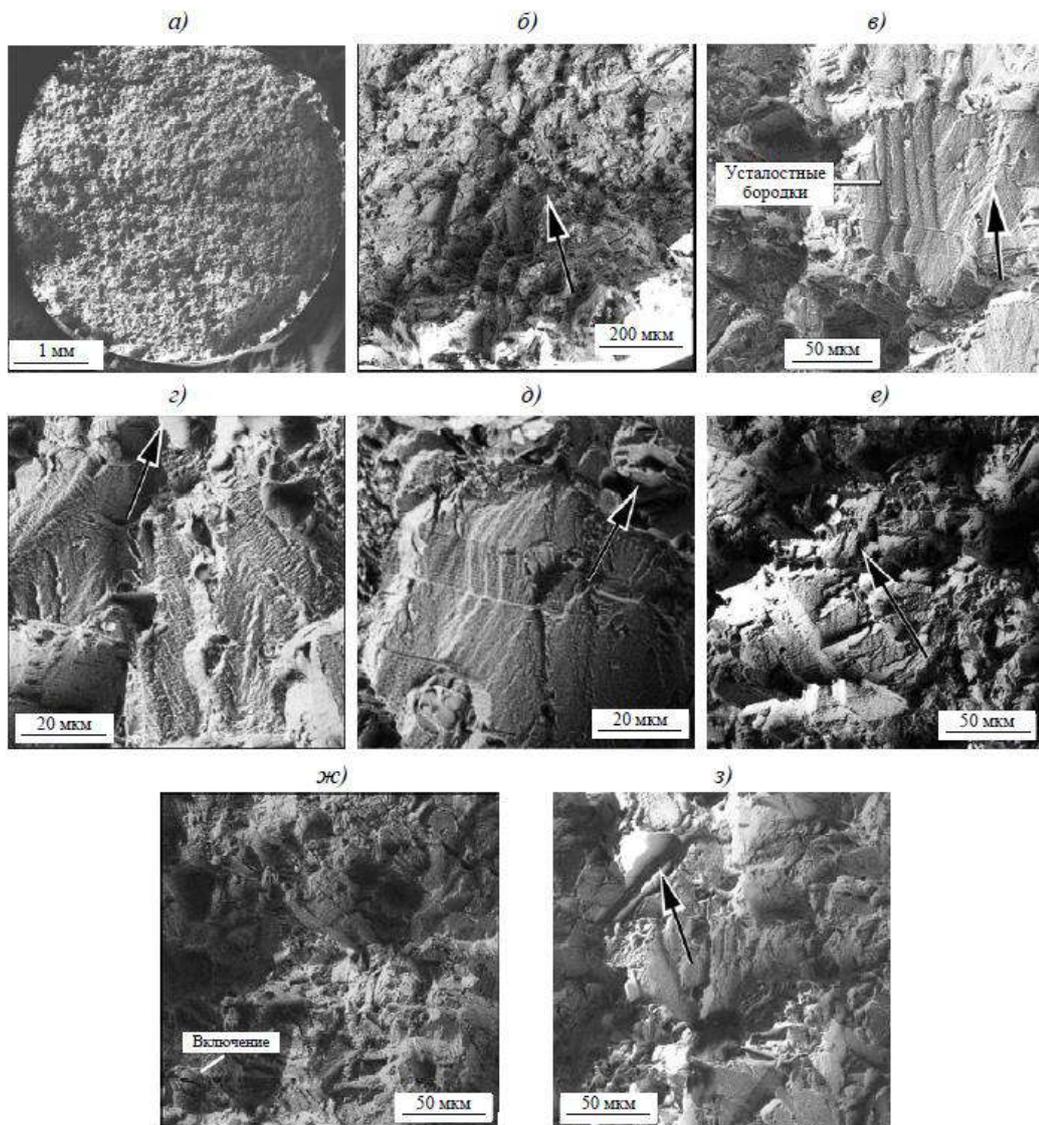


Рисунок 3.1. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при комнатной температуре: а, е, з – амплитуда деформации 0,6%, число циклов до разрушения 2483; б–д, ж – амплитуда деформации 0,4%, число циклов до разрушения $N = 10\ 251$ циклов

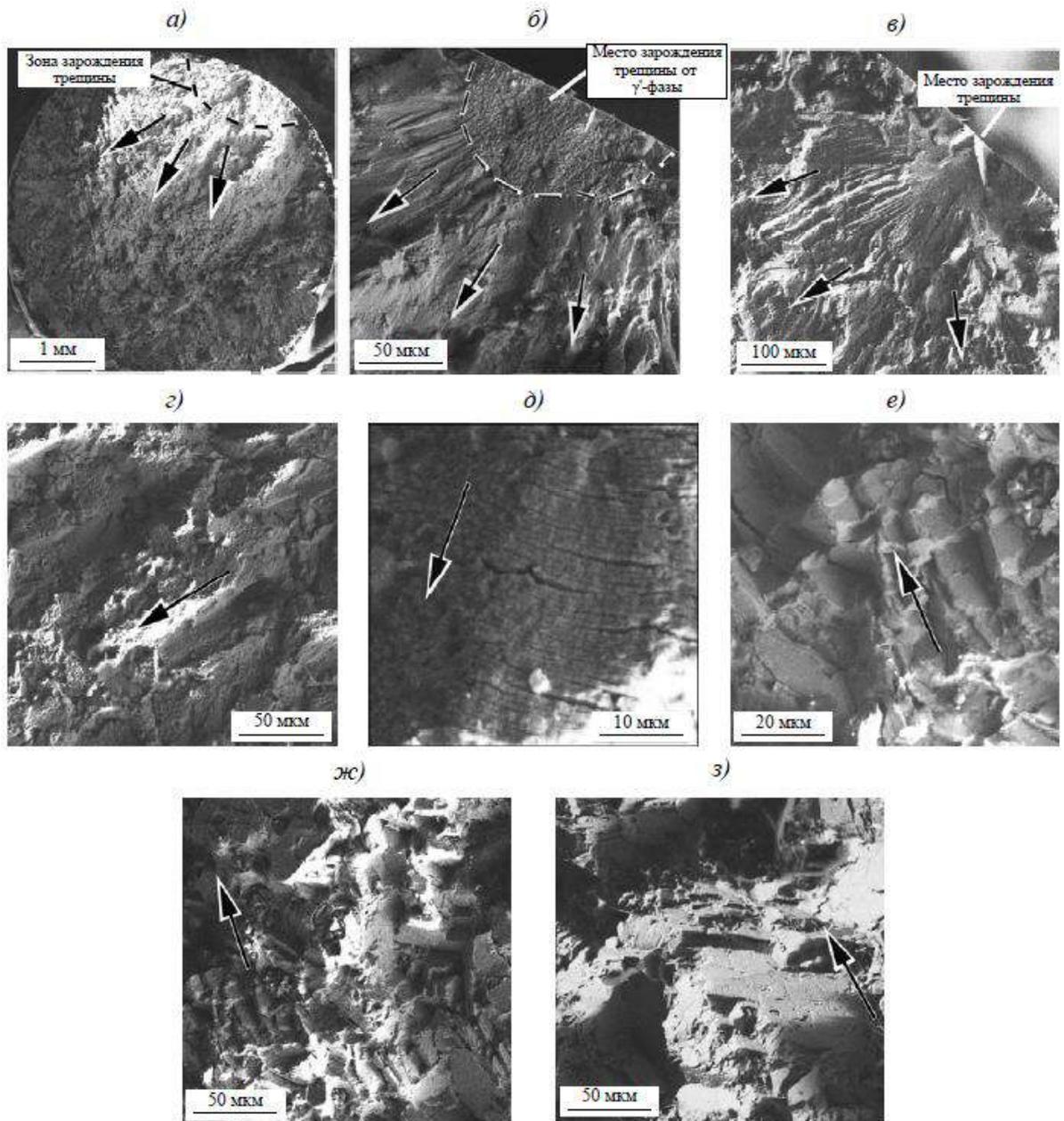


Рисунок 3.2. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при температуре 650°C и амплитуде нагружения 0,4%: а, б – число циклов до разрушения 4222; в–ж – число циклов до разрушения $N = 13\ 063$

Механизм малоциклового усталостного разрушения при температуре 20°C мало зависит от амплитуды деформации и связан с довольно грубым вязким характером разрушения, отражающим поликристаллическую структуру материала.

По контуру поверхности разрушения видно, что происходит зарождение микротрещины от нескольких очагов (рис. 3.1, а). В зоне начального распространения усталостной трещины наблюдается развитый вязкий характер разрушения с наличием гребенчатых образований и усталостных бороздок (рис. 3.1, б). В зоне стабильного роста трещины отчетливо виден

бороздчатый рельеф поверхности разрушения (рис. 3.1, в), а направление распространения усталостной трещины поперек бороздок меняется в зависимости от ориентации отдельных зерен матрицы (рис. 3.1, г–е). Ускоренное развитие усталостных трещин и статический долом связаны с развитым вязким характером разрушения (рис. 3.1, ж, з).

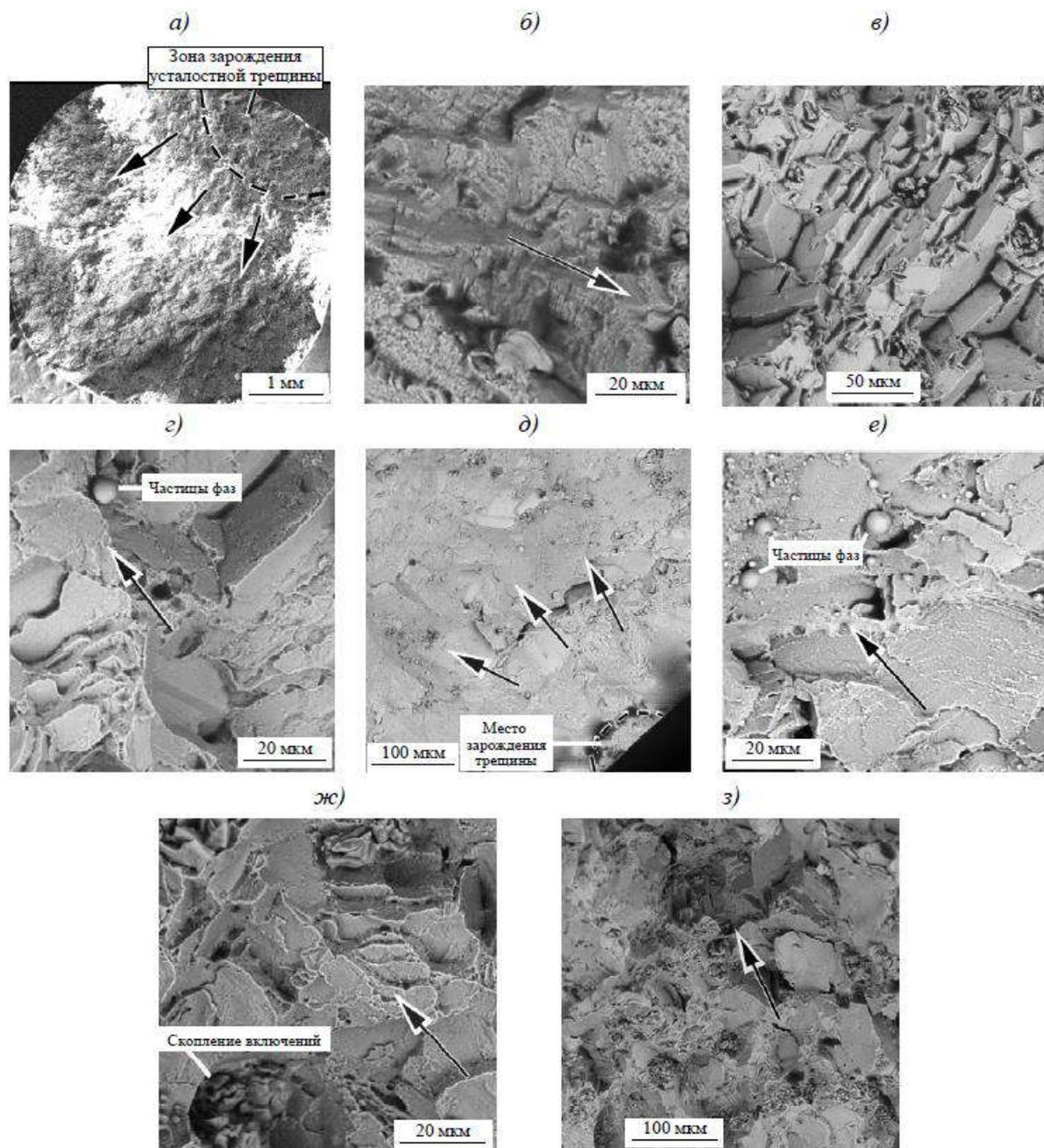


Рисунок 3.3. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при температуре 650°C и амплитуде нагружения 0,5%: а–г – число циклов до разрушения 1040; д–з – число циклов до разрушения $N = 894$

Проведено исследование поверхности разрушения образцов из сплава ВЖ175, испытанных на малоцикловую усталость при температурах 20 и 650 °С. При комнатной

температуре (рисунок 3.4) для любой деформации в рассматриваемом интервале на поверхности разрушения можно выделить зону А, которая соответствует области стабильного распространения трещины и характеризуется плоским рельефом. Зона Б характеризует рельеф на стадии ускоренного роста трещины и статического долома (рисунок 3.4, а) Во всех случаях зарождение усталостной трещины происходит на поверхности образца, при этом на поверхности разрушения наблюдается вязкий рельеф, который отражает развитие усталостной трещины на этой стадии.

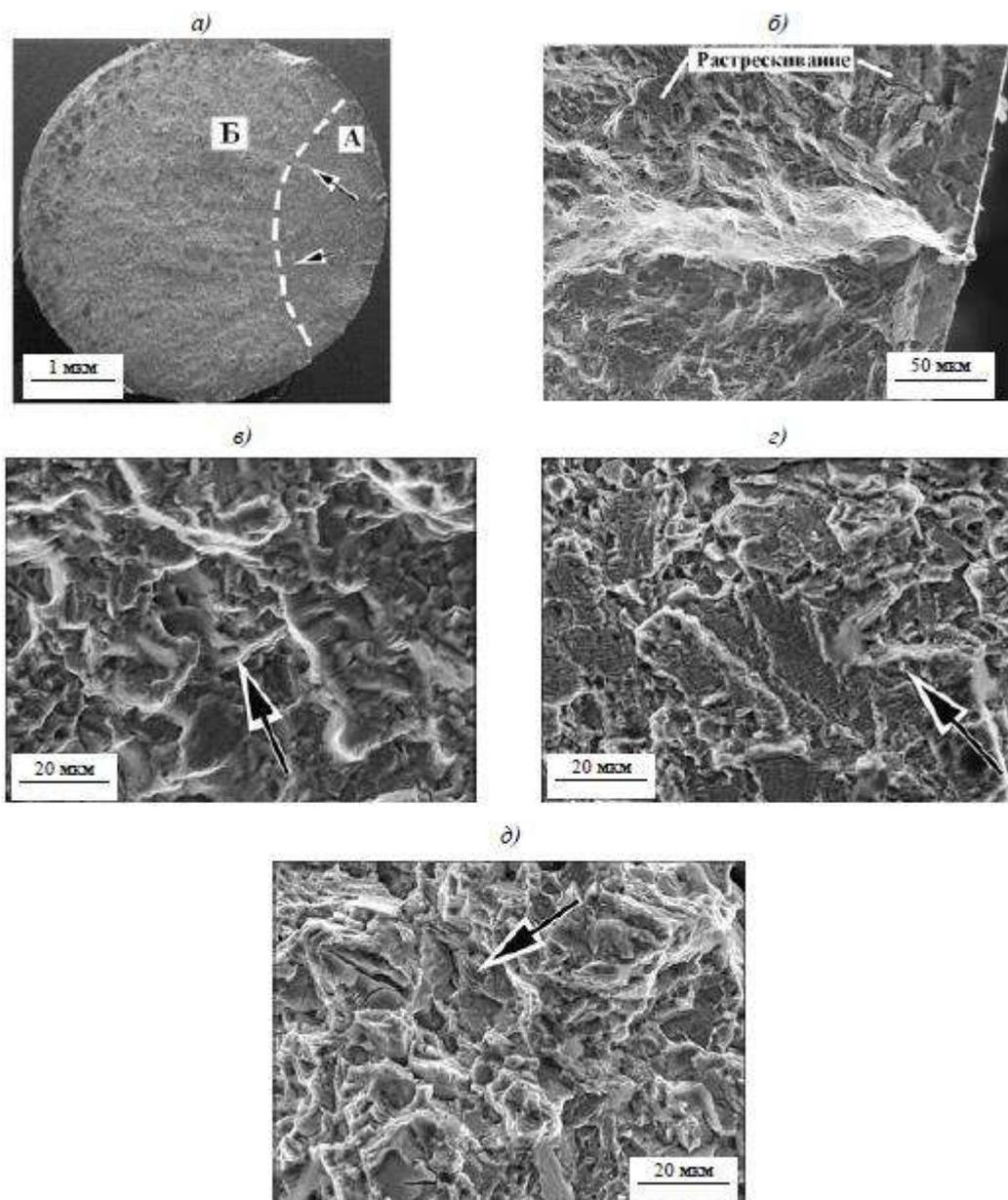


Рисунок 3.4 – фрактография образцов ВЖ175 при комнатной температуре

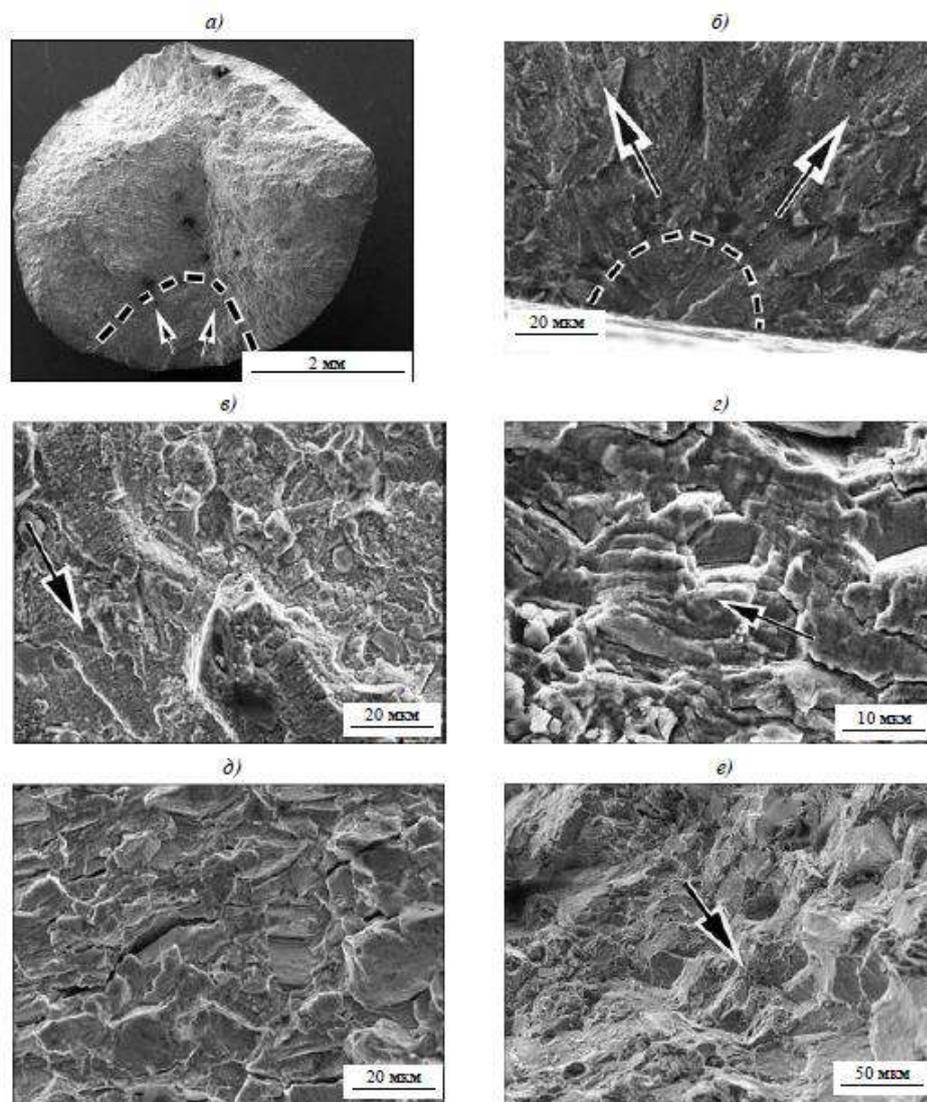


Рисунок 3.5 – фрактография образцов ВЖ175 при температуре 650°C

Результаты фрактографических исследований образцов из сплава ВЖ175, испытанных на МЦУ при различной температуре и коэффициентах асимметрии цикла нагружения, показали, что при комнатной температуре при симметричном цикле нагружения усталостное разрушение развивается с формированием усталостных бороздок, а очаг разрушения представлен фасетками скола. Повышение асимметрии цикла нагружения до 0,5 приводит к появлению в зоне усталостного развития трещины участков с фасетчатым рельефом на фоне бороздчатого.

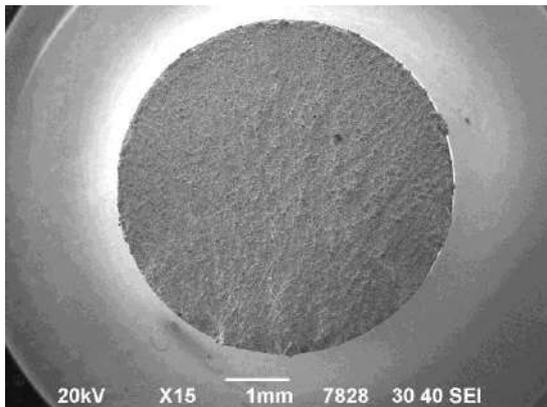
При 650 °С наблюдаемый очаг разрушения в обоих случаях представлен фасетками скола, а зоны усталостного развития трещины представлены усталостными бороздками при симметричном цикле нагружения и смешанным изломом (межзеренное и внутризеренное с усталостными бороздками) при $R=0,5$.

При 750 °С при симметричном цикле и $R=0,5$ разрушение развивается от фасеток скола, а зона усталостного развития трещины представлена межзеренным изломом.

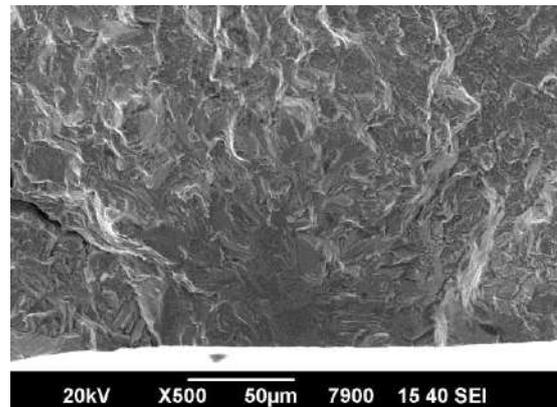
Таблица 3. 1 – Фрактографические особенности образцов из сплава ВЖ175 испытанных на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения

Температура	R	Очаг	Зона усталостного развития трещины
20 °С	-1	Фасетки скола	Усталостные бороздки
	0,5		Смешанное разрушение (бороздки, фасетки)
650 °С	-1	Фасетки скола	Усталостные бороздки
	0,5		Смешанное разрушение (бороздки, межзеренное)
750 °С	-1	Фасетки скола	Межзеренное
	0,5		

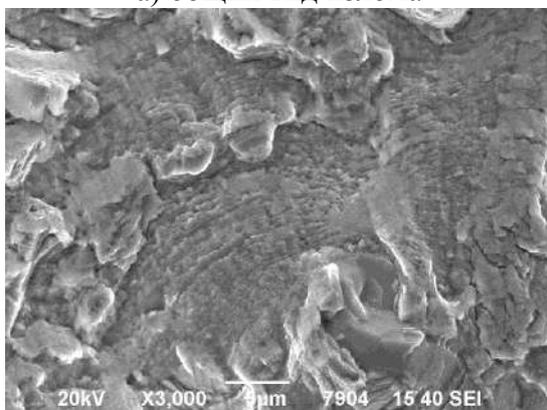
На изображенном на рисунке 3.11 образце очаг представлен фасетками, зона усталостного развития усталостными бороздками. На изображенном на рисунке 3.12 образце очаг представлен границами зерен аномально большого размера (более 100мкм), зона усталостного развития межзеренным разрушением. На изображенном на рисунке 3.13 образце очаг представлен фасетками, зона усталостного развития межзеренным разрушением.



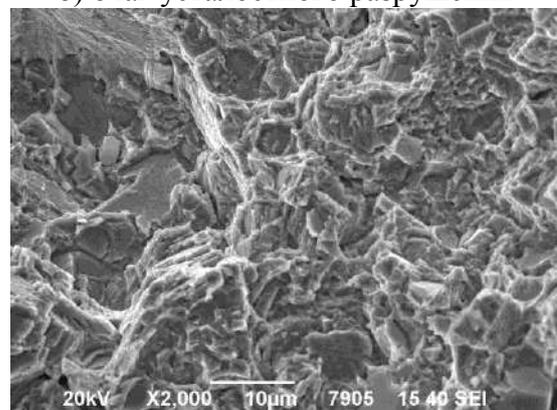
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

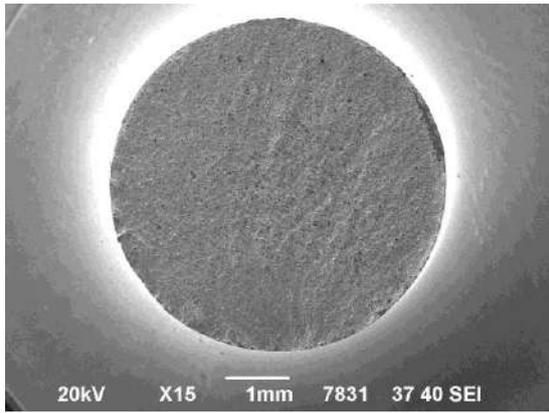


в) зона усталостного развития трещины

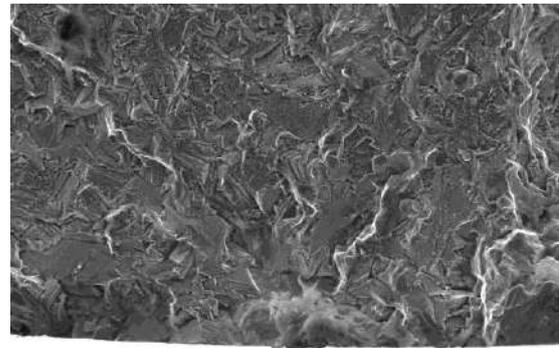


г) статический долом

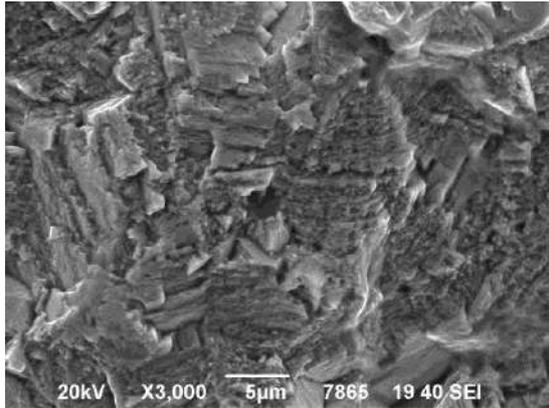
Рисунок 3.6 – Излом образца из ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,5\%$, $N=15098$ циклов



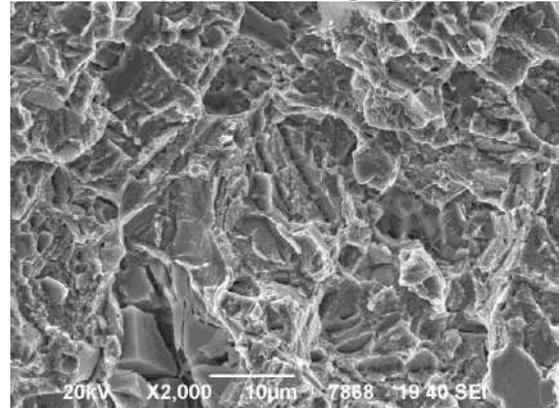
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

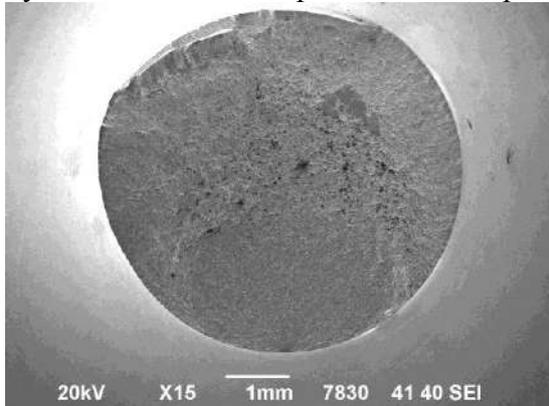


в) зона усталостного развития трещины

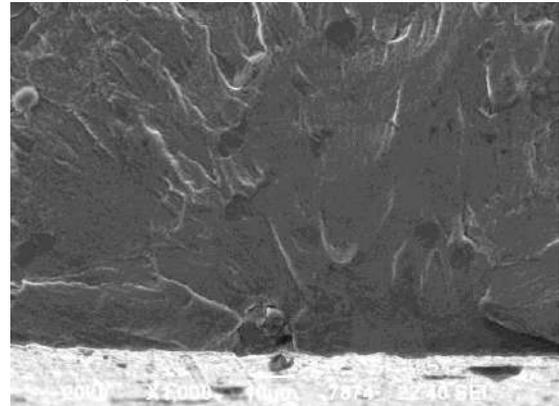


г) статический долом

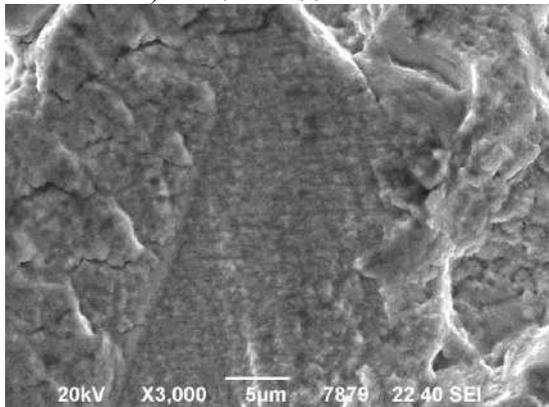
Рисунок 3.7 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\epsilon_a=0,6\%$, $N=6630$ циклов



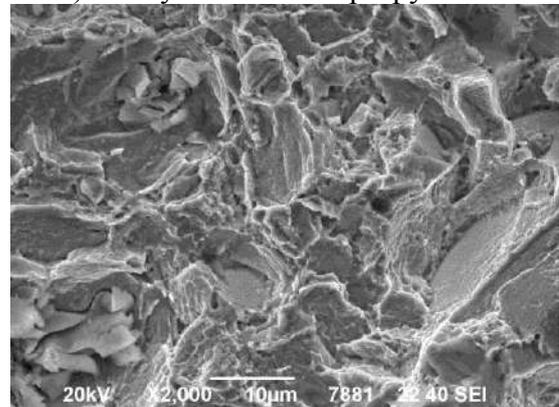
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

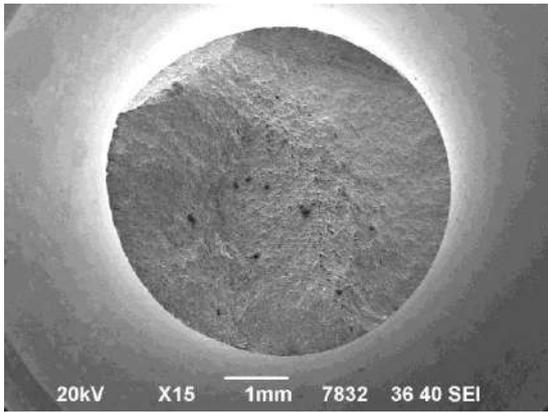


в) зона усталостного развития трещины

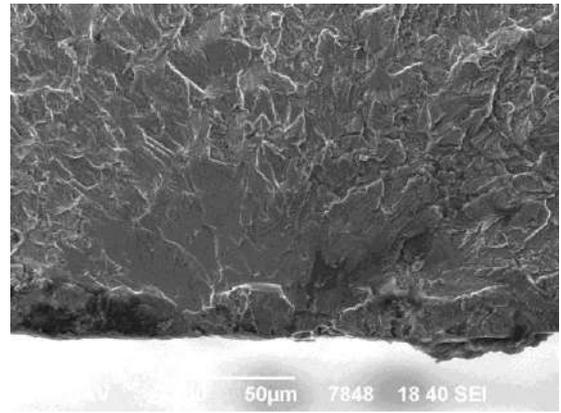


г) статический долом

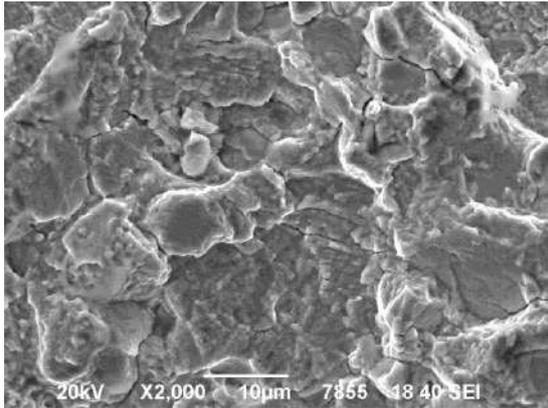
Рисунок 3.8 – Излом образца из ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,475\%$, $N=22230$ циклов



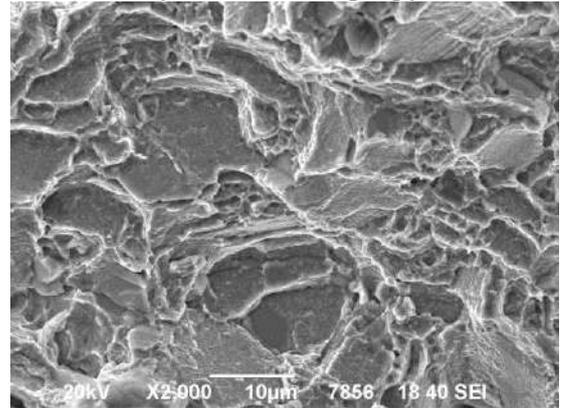
а) общий вид излома



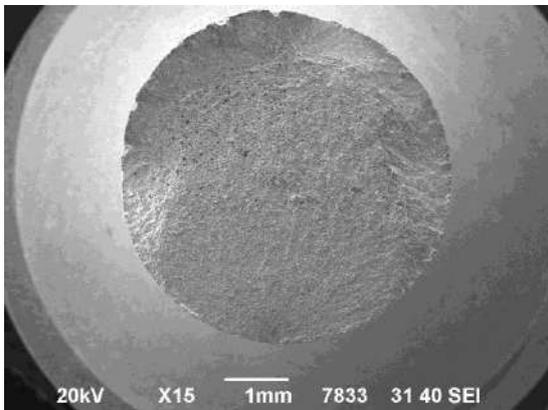
б) очаг усталостного разрушения



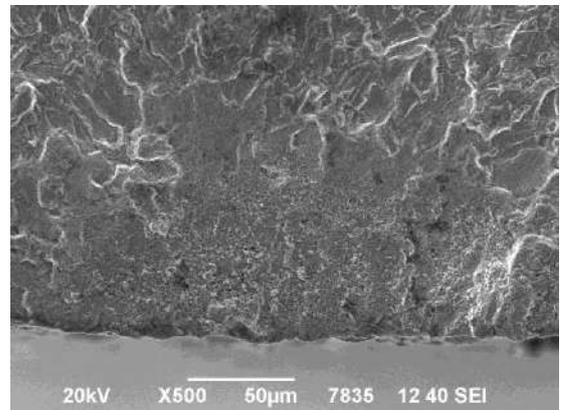
в) зона усталостного развития трещины



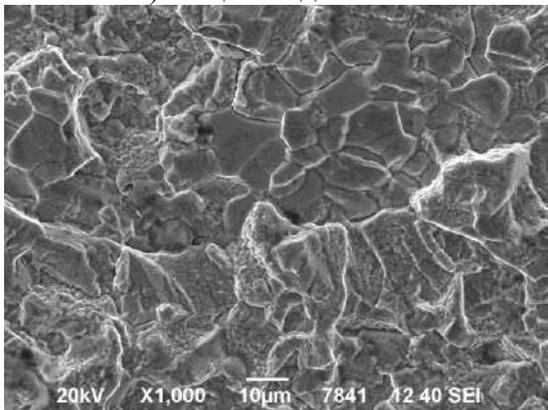
г) статический долом

Рисунок 3.9 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\varepsilon_a=0,4\%$, $N=19129$ циклов

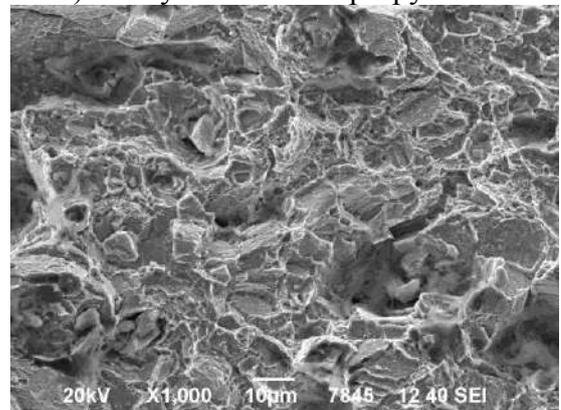
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

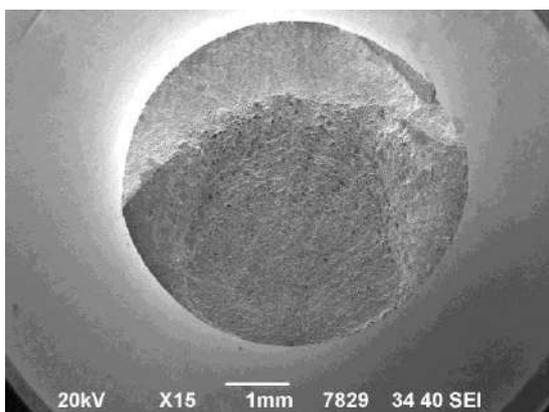


в) зона усталостного развития трещины

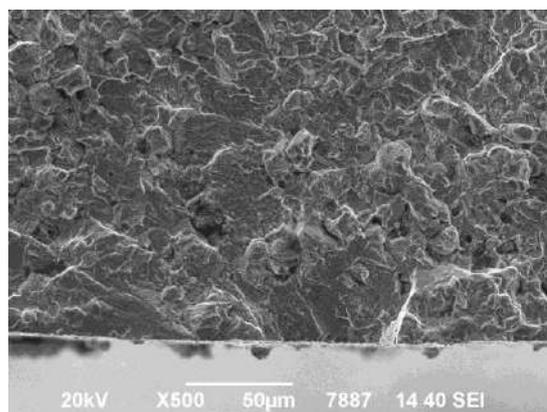


г) статический долом

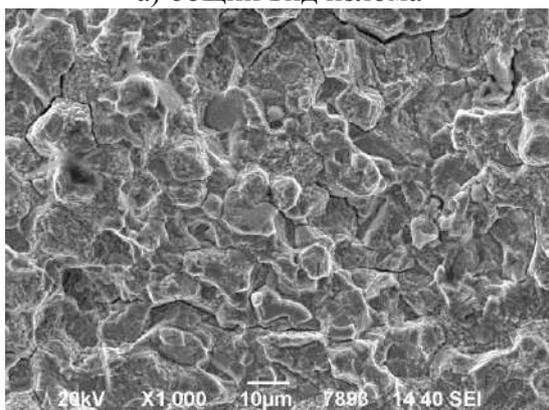
Рисунок 3.10 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\varepsilon_a=0,4\%$, $N=26409$ циклов



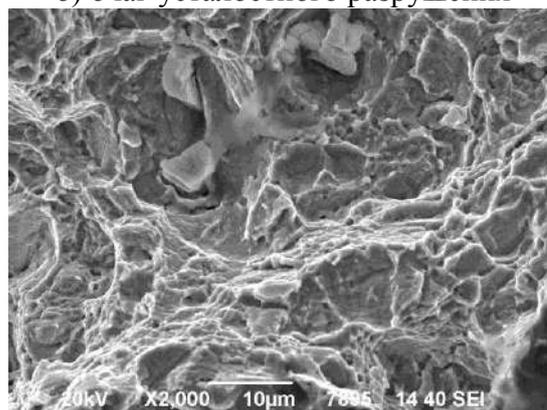
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения



в) зона усталостного развития трещины



г) статический долом

Рисунок 3.11 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\varepsilon_a=0,3\%$, $N=45702$ циклов

«Мягкий» цикл

Для фрактографических исследований ВЖ175 при «мягком» цикле выбрано по два испытанных при контроле нагрузки в цикле образца от каждой выборки, которые соответствовали одной из трех температур (20, 750, 650 °С) и одному из трех коэффициентов асимметрии ($R=-1$; $R=0$; $R=0.5$). Один из двух образцов выбирался на уровне, соответствующем долговечности более 10^4 циклов, другой – менее 10^4 циклов.

Изломы представлены на рисунках 3.13-3.28. Результаты фрактографических исследований образцов из сплава ВЖ175, испытанных на малоцикловую усталость при «мягком» цикле нагружения, показали, что при комнатной температуре при симметричном и отнулевом циклах нагружения усталостное разрушение развивается с формированием усталостных бороздок, а очаг разрушения представлен фасетками скола. Повышение коэффициента асимметрии цикла нагружения до 0,5 приводит к изменению строения зоны усталостного развития трещины на фасетчатый.

При 650 °С наблюдается похожая картина, но при высокой асимметрии цикла ($R=0,5$) и очаг, и зона усталостного развития трещины представлены смешанным изломом (межзеренное и внутризеренное с фасетками скола).

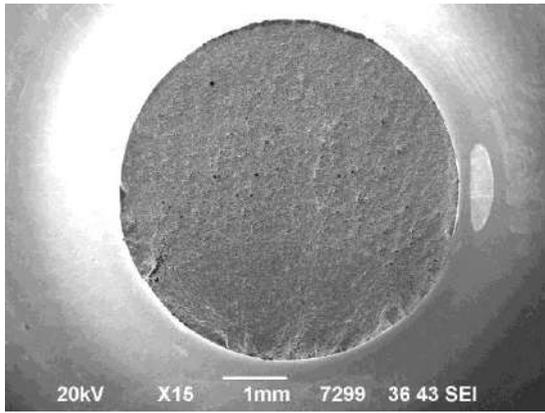
При 750 °С при симметричном цикле нагружения разрушение развивается от фасеток скола, а зона усталостного развития трещины представлена смешанным изломом. При отнулевом цикле нагружения и очаг и зона усталостного развития трещины представлены смещенным изломом. При R=0,5 и очаг и зона развития трещины представлены межзерненным разрушением.

На образце изображенном на рисунке 3.19 образце очаги разрушения расположены под поверхностью и являются неметаллическими включениями. На всех остальных образцах очаги разрушения расположены вблизи поверхности. Статический долом во всех случаях представлен мелкоямочным рельефом по вязкой матрице и фасетками скола по карбидной фазе.

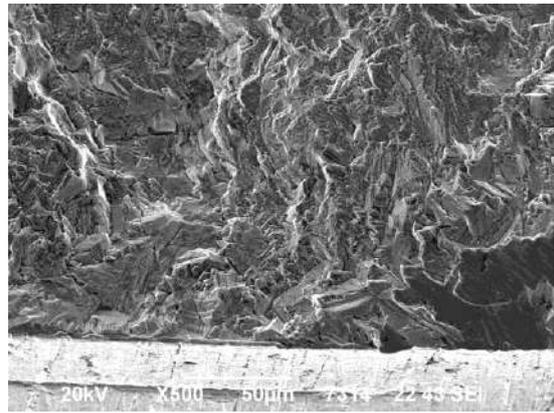
Таким образом, можно заключить, что повышение температуры испытаний от комнатной до 750 °С, и R от -1 до 0,5, приводит к изменению строения очага усталостного разрушения от фасеток скола, к смещенному и далее к межзернному, а зоны усталостного развития трещины от усталостных бороздок, к фасеткам скола, далее к смещенному и межзернному разрушению.

Таблица 3.2 – Фрактографические особенности образцов из сплава ВЖ175 на малоцикловую усталость при «мягком» цикле

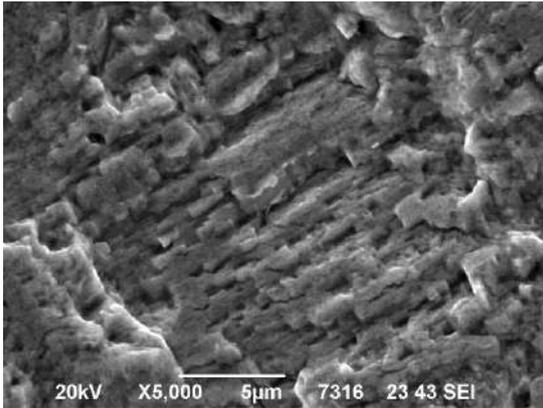
Температура	R	Очаг	Зона усталостного развития трещины
20 °С	-1	Фасетки скола	Усталостные бороздки
	0		
	0,5		Фасетки скола
650 °С	-1	Фасетки скола	Усталостные бороздки
	0	Фасетки скола, нематаллическое включение	Усталостные бороздки, фасетки скола
	0,5	Смешанное разрушение	Смешанное разрушение
750 °С	-1	Фасетки скола	Смешанное разрушение
	0	Смешанное разрушение	Смешанное разрушение
	0,5	Межзерненное	Межзерненное



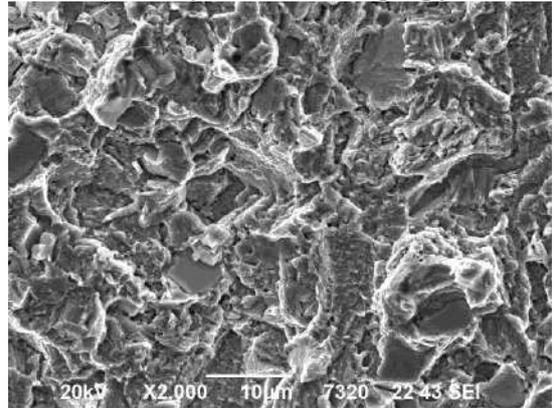
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

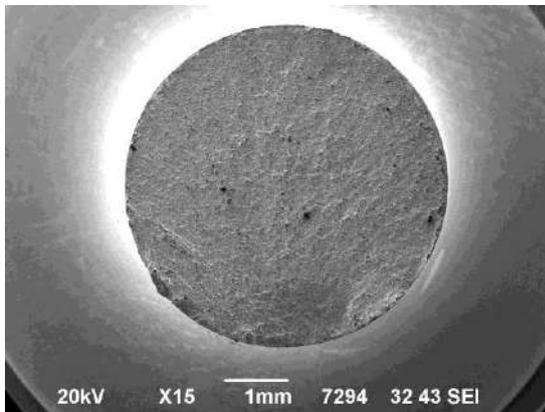


в) зона усталостного развития трещины

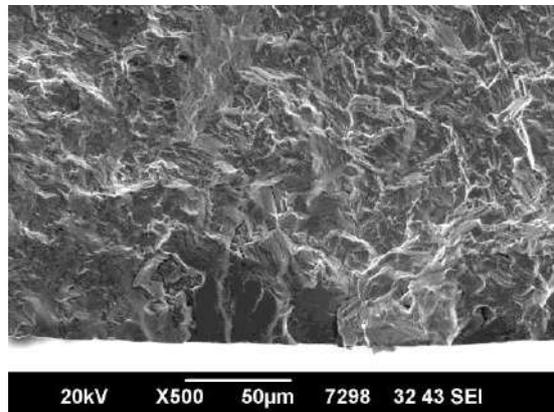


г) статический долом

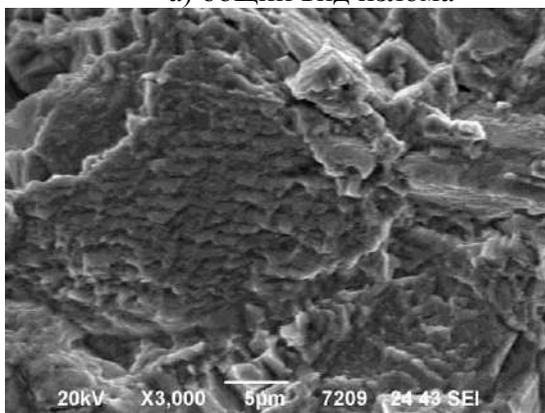
Рисунок 3.12 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=950\text{МПа}$, $N=17105$



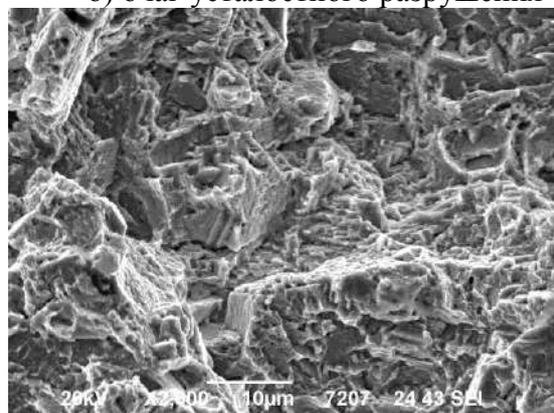
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

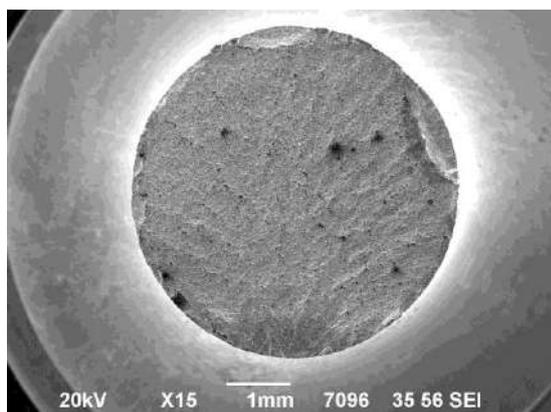


в) зона усталостного развития трещины

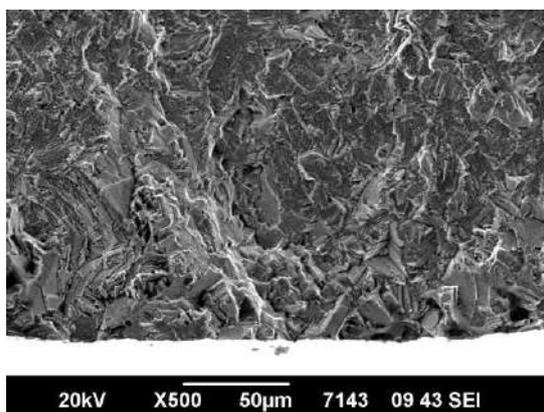


г) статический долом

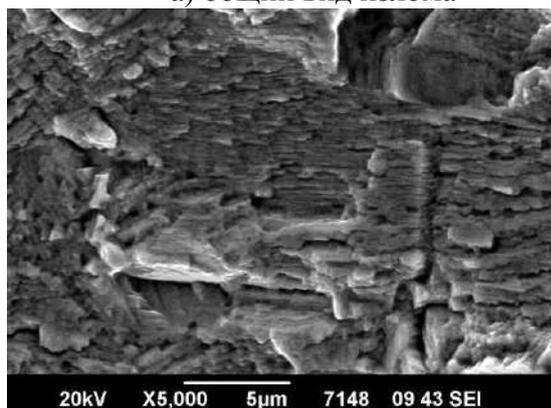
Рисунок 3.13 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=1100\text{МПа}$, $N=1578$ циклов



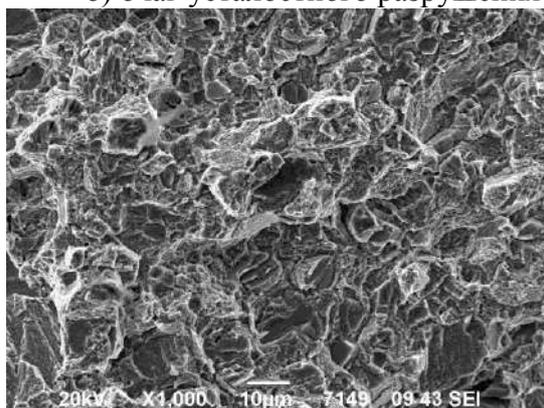
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

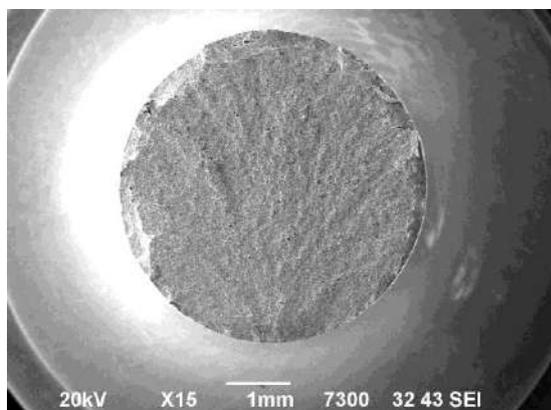


в) зона усталостного развития трещины

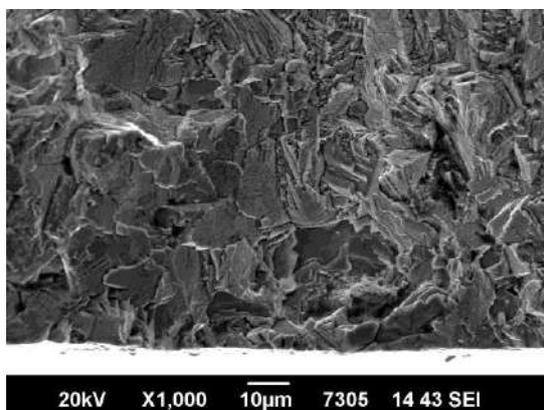


г) статический долом

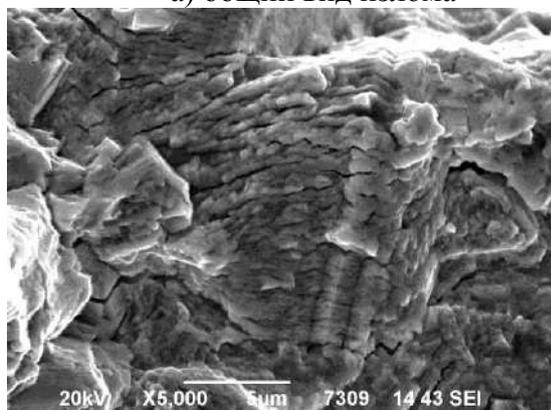
Рисунок 3.14 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\max}=1300\text{МПа}$, $N=13474$ циклов



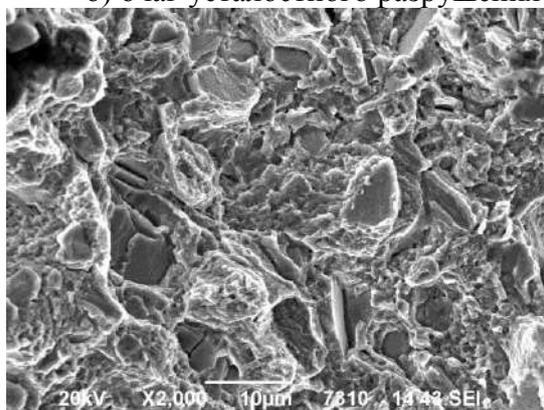
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

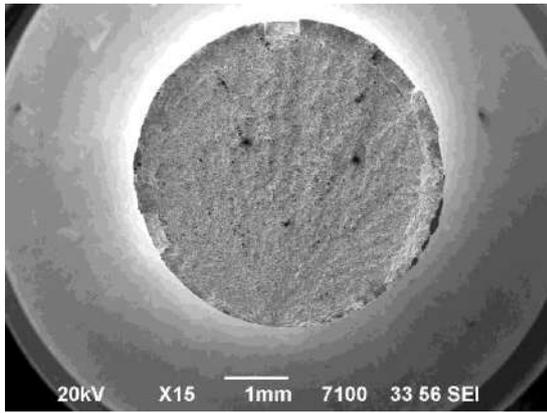


в) зона усталостного развития трещины

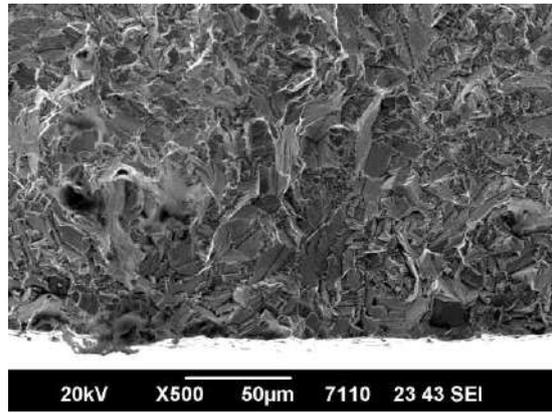


г) статический долом

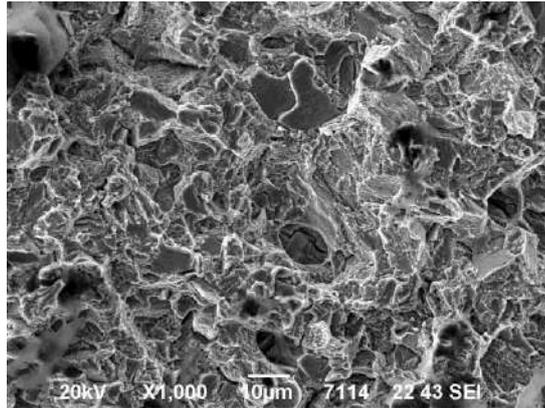
Рисунок 3.15 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\max}=1500\text{МПа}$, $N=4295$ циклов



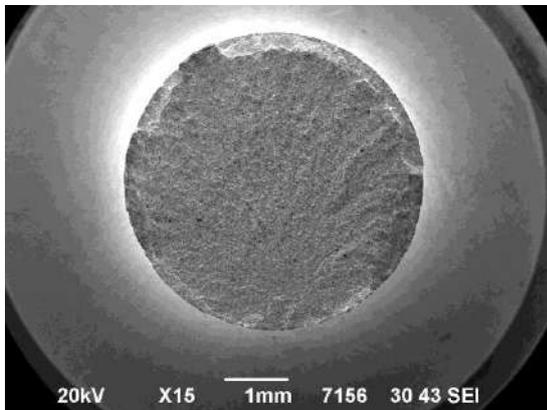
а) общий вид излома



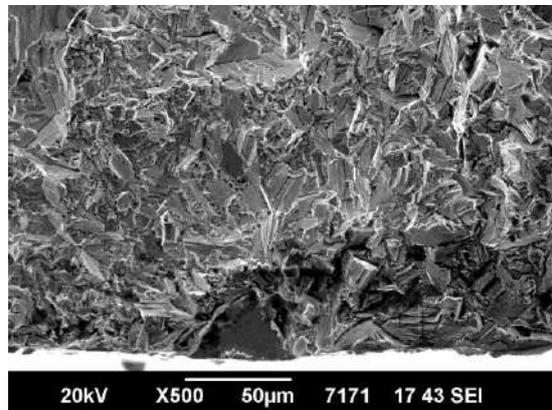
б) очаг усталостного разрушения



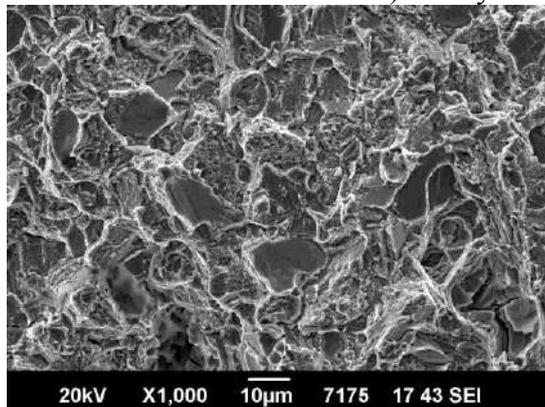
в) статический долом

Рисунок 3.16 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=1640\text{МПа}$, $N=5826$ циклов

а) общий вид излома

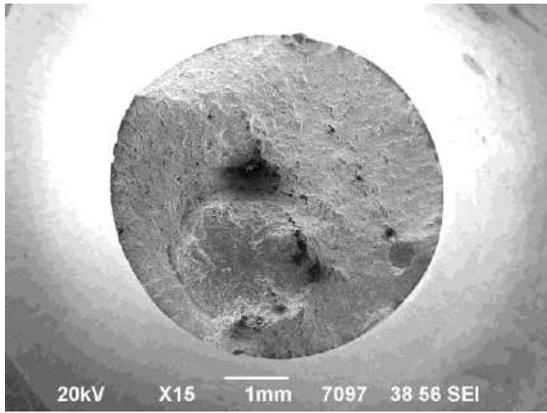


б) очаг усталостного разрушения

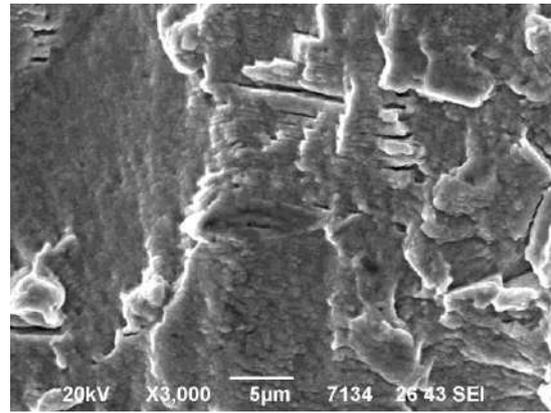


в) статический долом

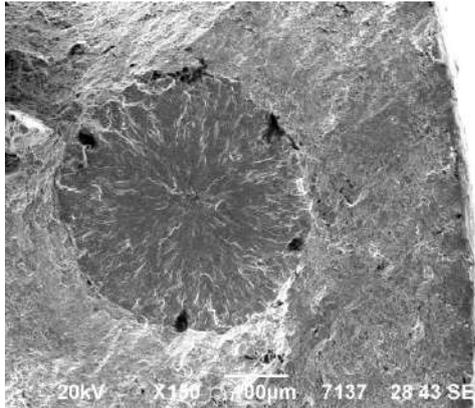
Рисунок 3.17 – Излом образца ВЖ175 при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=1600\text{МПа}$, $N=10115$ циклов



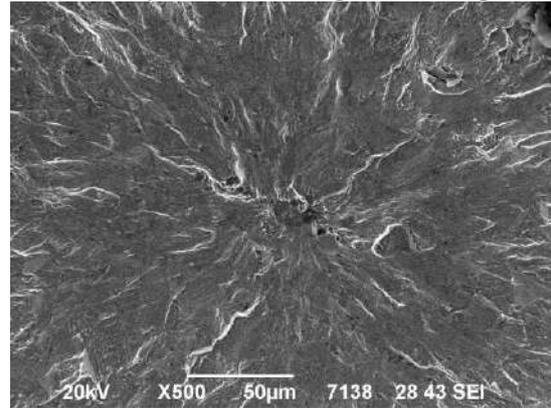
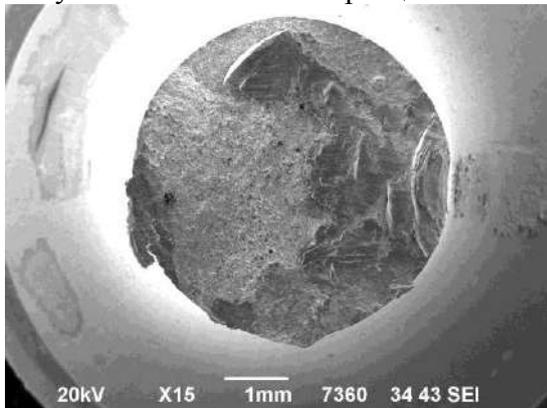
а) общий вид излома



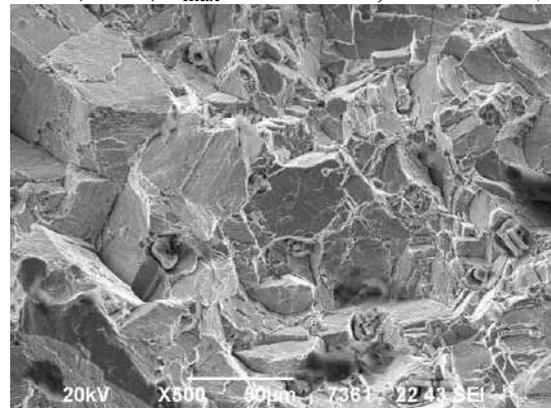
б) зона усталостного развития трещины



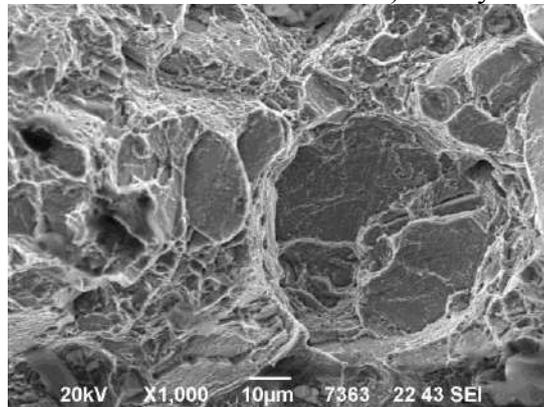
в) очаги усталостного разрушения

Рисунок 3.18 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\max}=1240\text{МПа}$, $N=17037$ циклов

а) общий вид излома

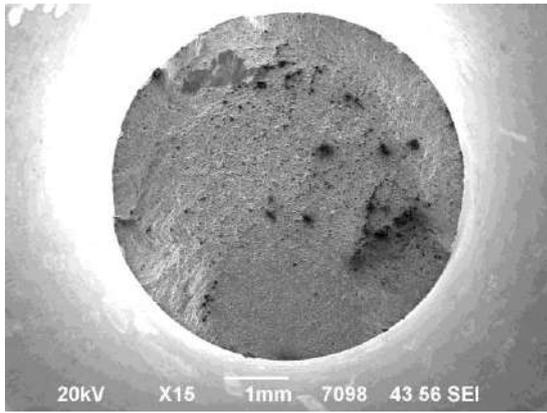


б) очаг усталостного разрушения

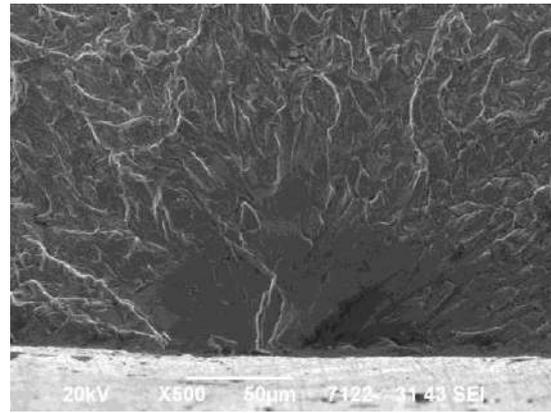


в) статический долом

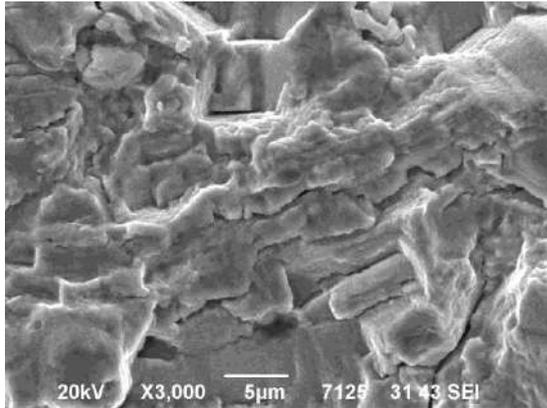
Рисунок 3.19 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\max}=1240\text{МПа}$, $N=3218$ циклов



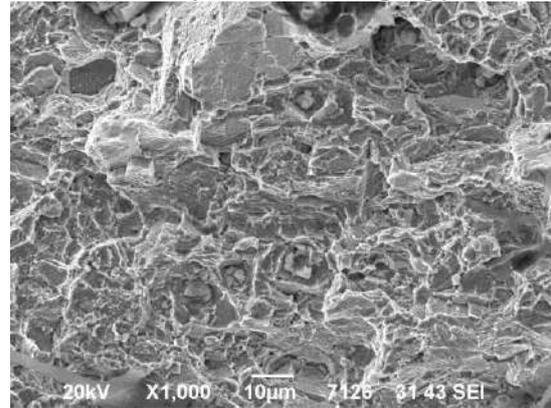
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

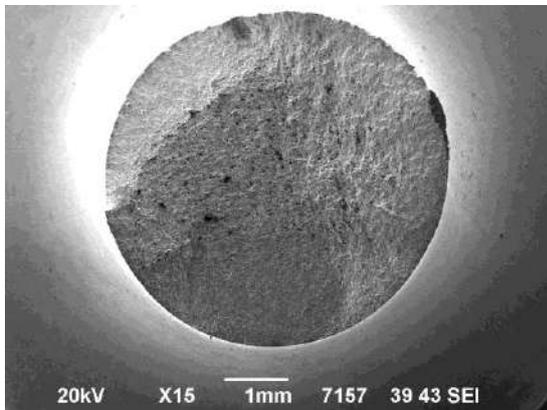


в) зона усталостного развития трещины

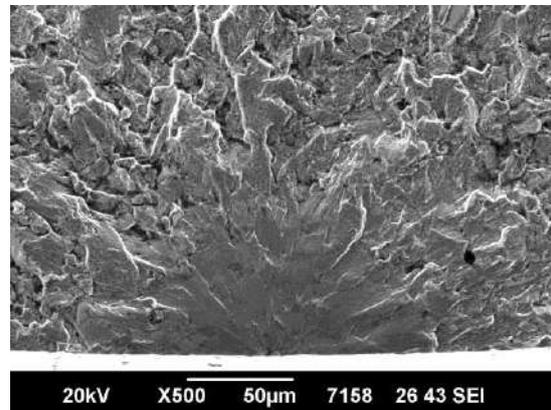


г) статический долом

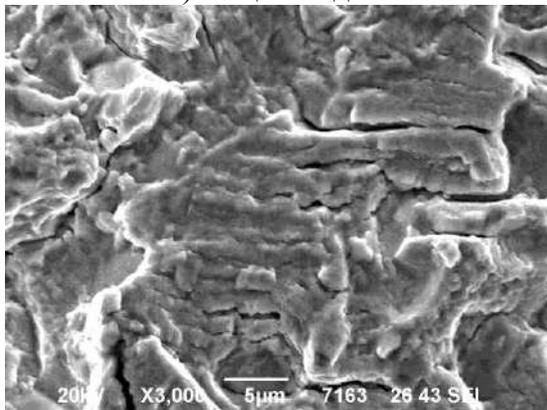
Рисунок 3.20 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=950\text{МПа}$, $N=9106$ циклов



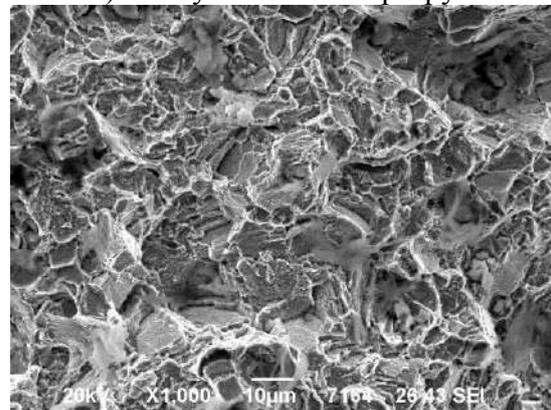
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

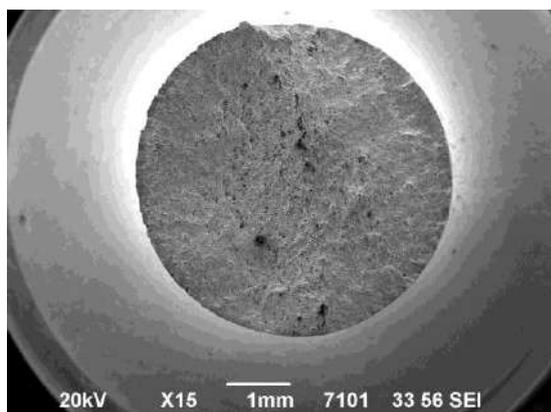


в) зона усталостного развития трещины

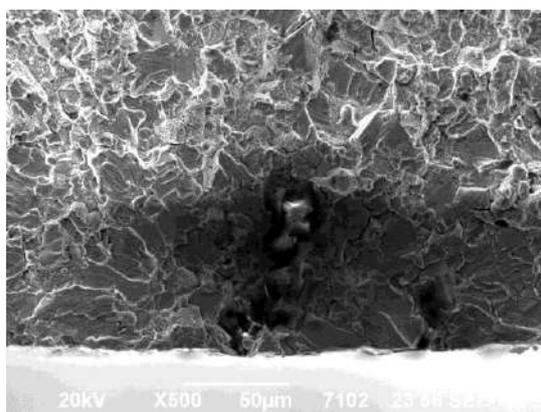


г) статический долом

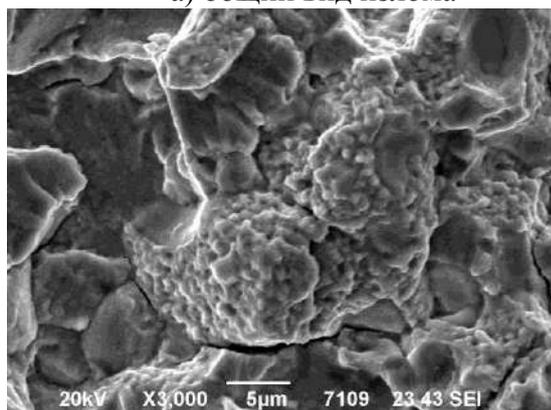
Рисунок 3.21 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=900\text{МПа}$, $N=22348$ циклов



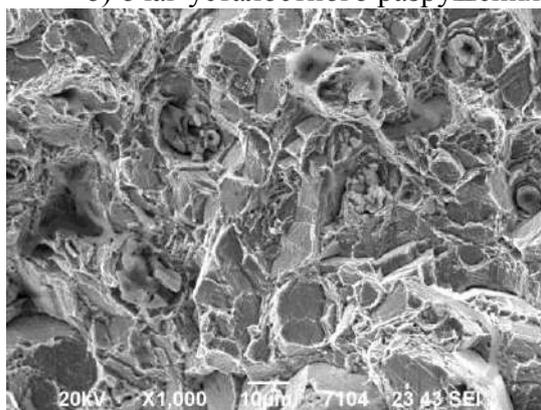
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

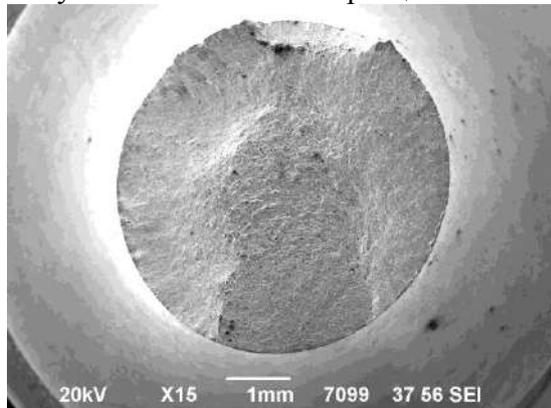


в) зона усталостного развития трещины

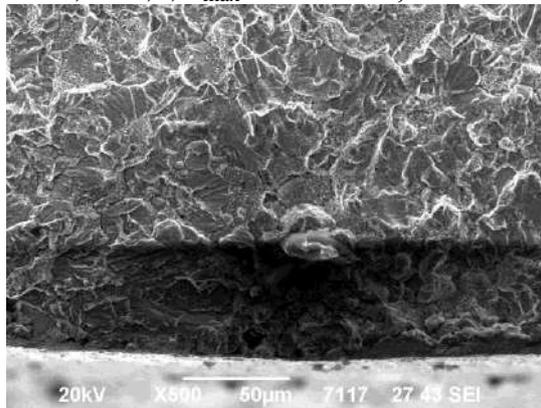


г) статический долом

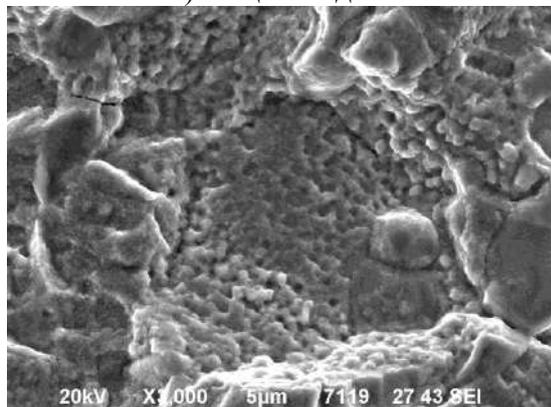
Рисунок 3.22 – Излом образца ВЖ175 при $T=650^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=1400\text{МПа}$, $N=5688$ циклов



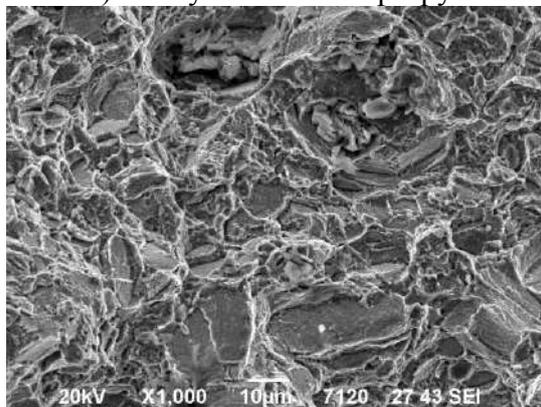
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

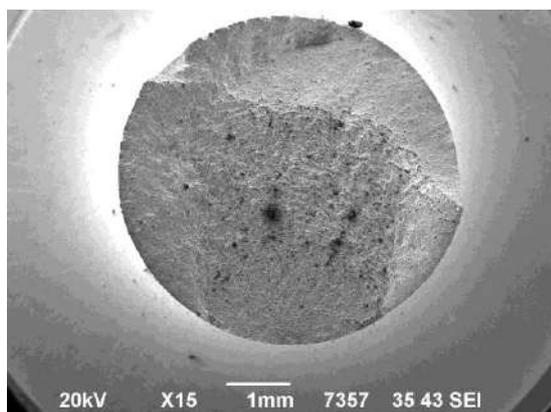


в) зона усталостного развития трещины

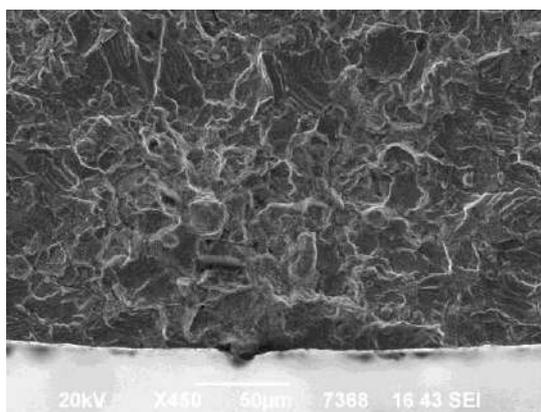


г) статический долом

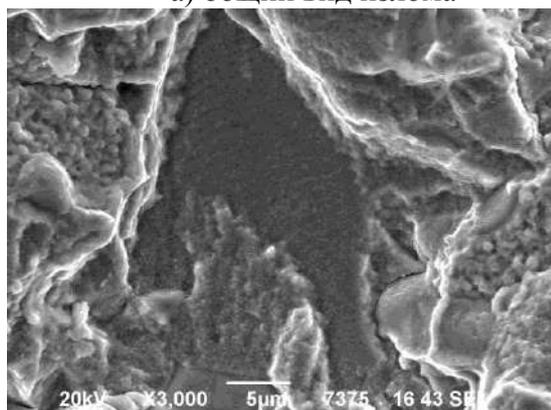
Рисунок 3.23 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=1100\text{МПа}$, $N=6156$ циклов



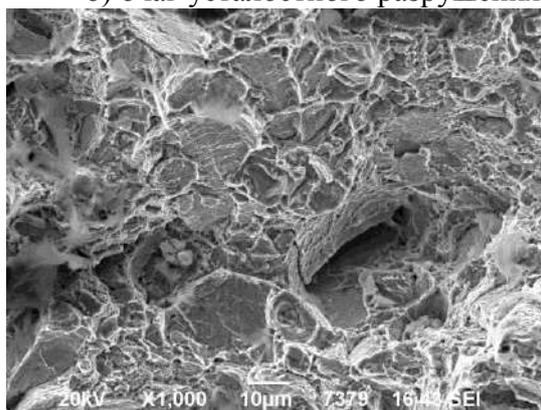
а) общий вид излома



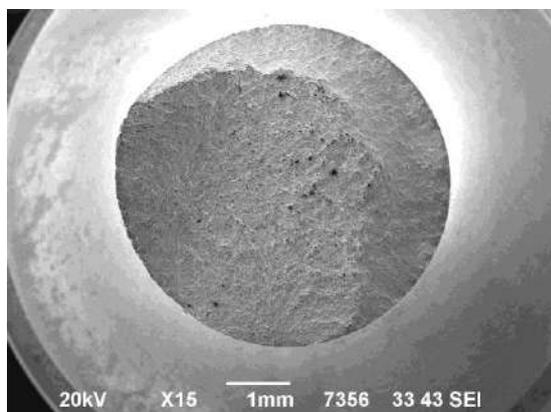
б) очаг усталостного разрушения



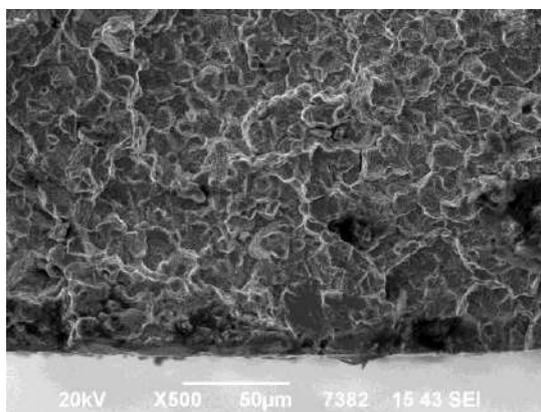
в) зона усталостного развития трещины



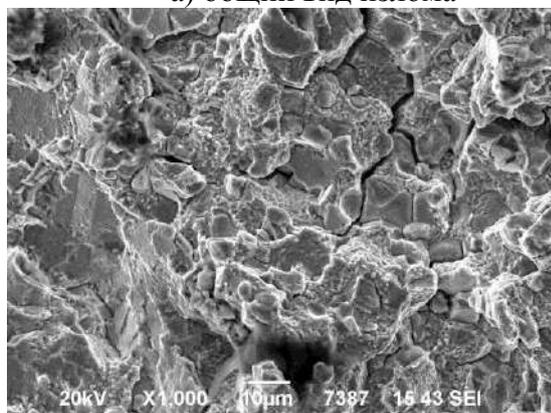
г) статический долом

Рисунок 3.24 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=1050\text{МПа}$, $N=16336$ циклов

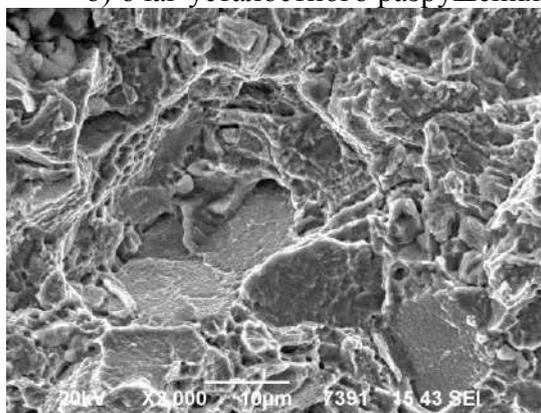
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения



в) зона усталостного развития трещины

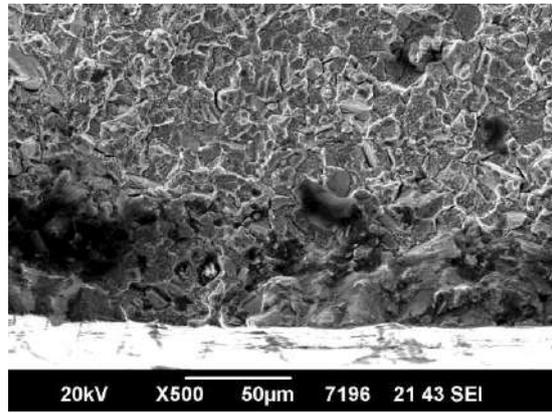


г) статический долом

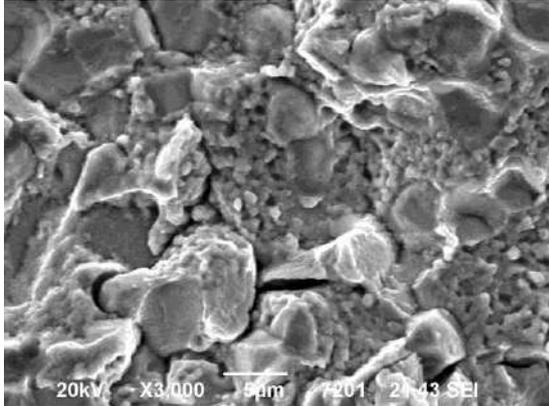
Рисунок 3.25 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=1000\text{МПа}$, $N=15813$ циклов



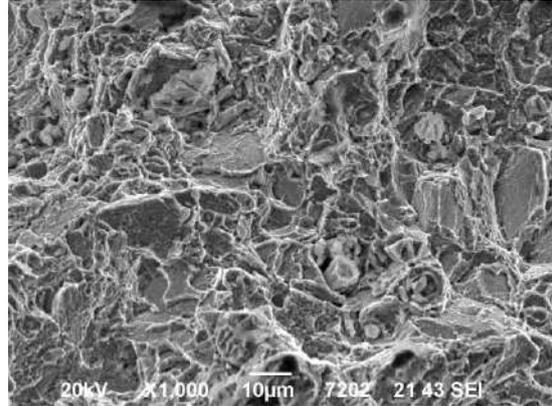
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

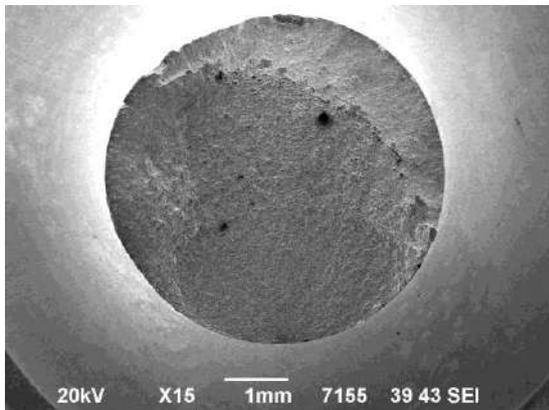


в) зона усталостного развития трещины

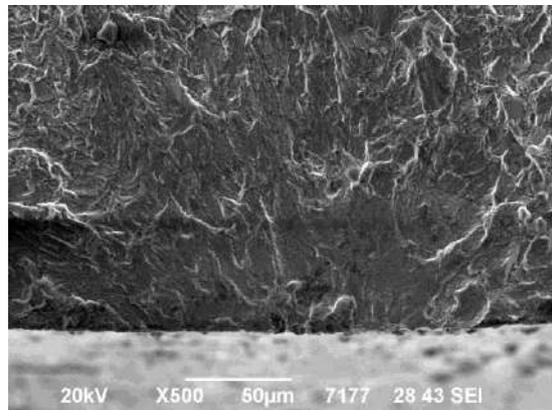


г) статический долом

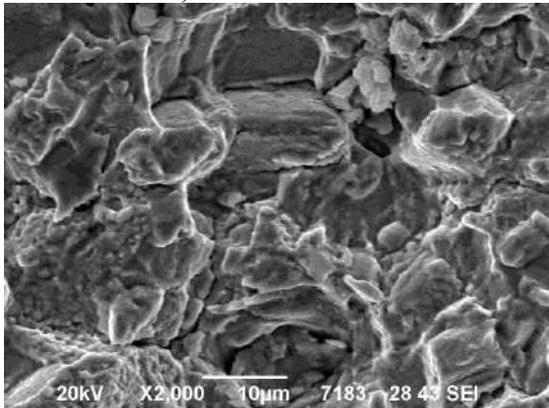
Рисунок 3.26 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=1100\text{МПа}$, $N=2266$ циклов



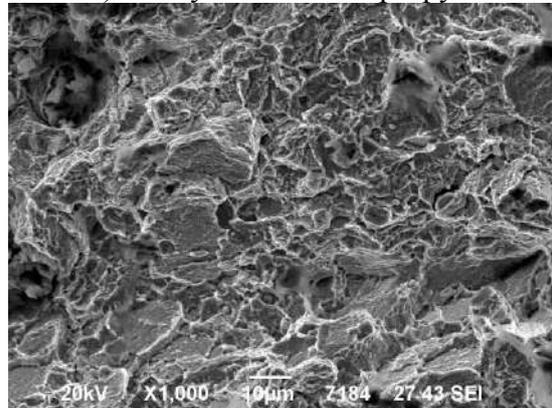
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения

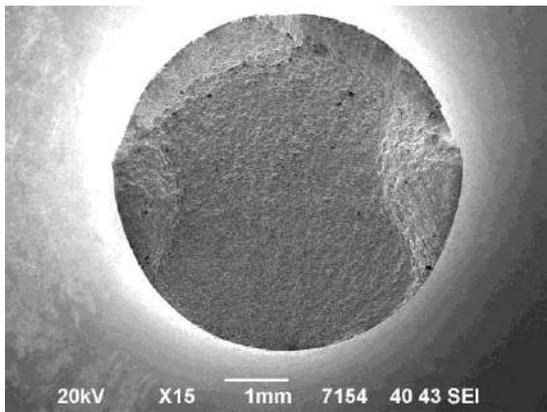


в) зона усталостного развития трещины

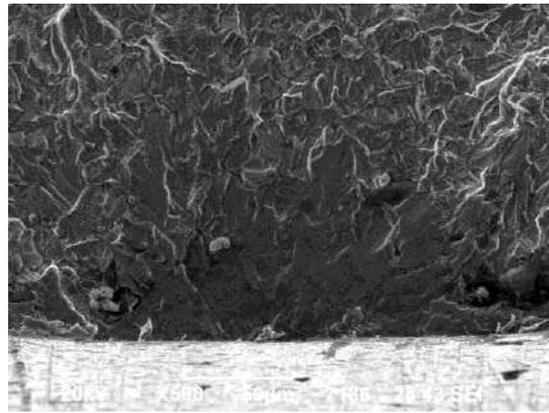


г) статический долом

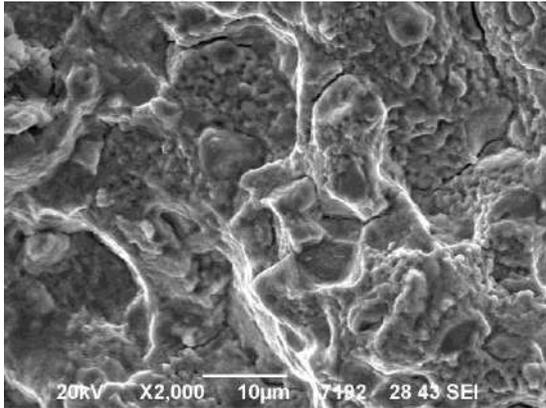
Рисунок 3.27 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=800\text{МПа}$, $N=4364$ циклов



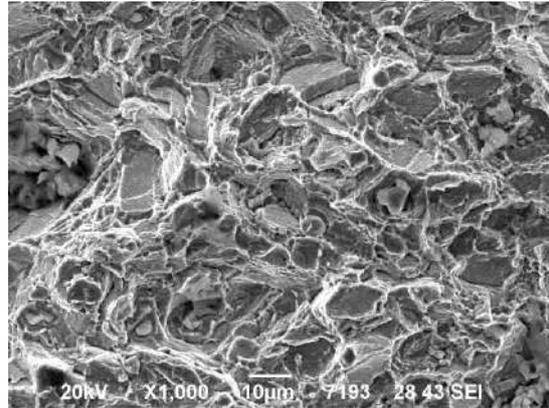
а) общий вид излома



б) очаг усталостного разрушения



в) зона усталостного развития трещины



г) статический долом

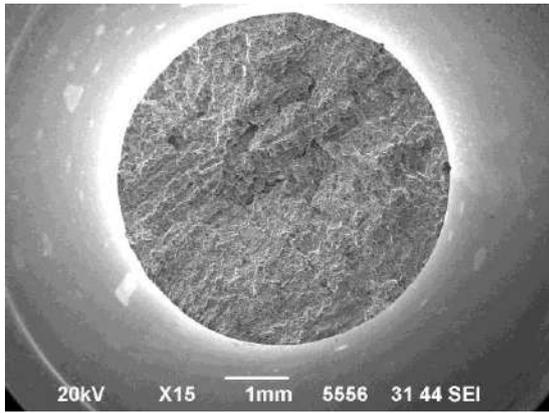
Рисунок 3.28 – Излом образца ВЖ175 при $T=750^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=775\text{МПа}$, $N=20\,769$ циклов

3.2. Фрактография ВКНА-1ВР

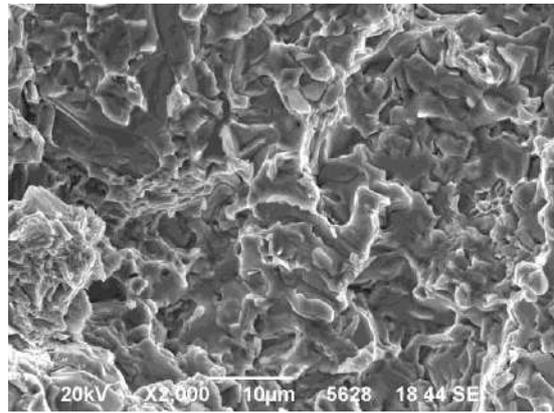
Для фрактографических исследований ВКНА-1ВР взято по два образца от каждой выборки, которые соответствовали одной из трех температур (20, 850, 1050 °С), одному из трех коэффициентов асимметрии ($R=-1$; $R=0$; $R=0.5$) и одному из двух режимов нагружения – при контроле нагрузки и при контроле деформации. Один из этих образцов выбирался на уровне, соответствующем долговечности более 10^4 циклов, другой – менее 10^4 циклов.

Изломы образцов из ВКНА-1ВР приведены на рисунках 3.29-3.56. Результаты фрактографических исследований показали, что во всех случаях вне зависимости от условий испытаний разрушение развивается по границам дендритов или внутризеренно с формированием вязких ямок по матрице и фасеток скола по упрочняющей и карбидной фазам. На изломах образцов, изображенных на рисунках 3.31, 3.32, 3.39, 3.41, 3.43, 3.49, ярко выражены очаги усталостного разрушения. Других признаков усталостного разрушения на исследованных образцах не выявлено. На образцах, испытанных при температуре $T=1050^{\circ}\text{C}$, обнаружены следы высокотемпературного окисления.

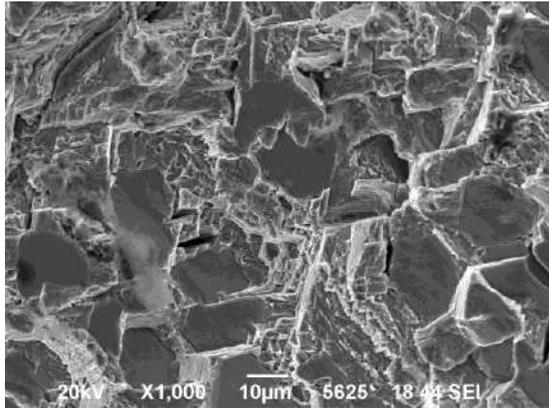
Установлено, что характер разрушения образцов ВКНА-1ВР не зависит от коэффициента асимметрии и выбора контролируемого параметра – деформации или напряжения.



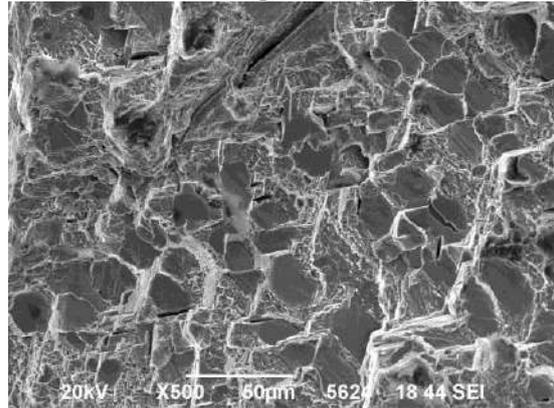
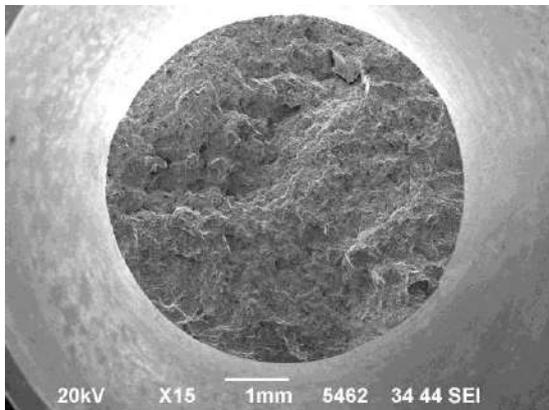
а) общий вид излома



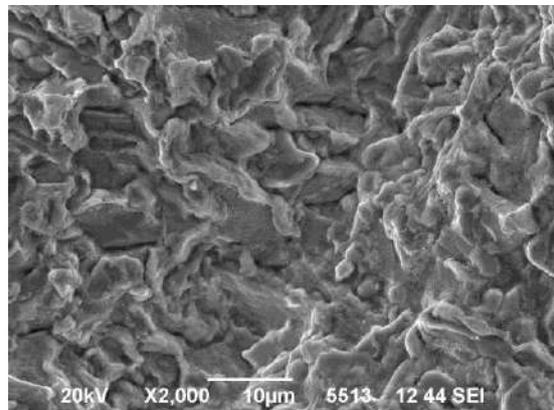
б) междендритное разрушение



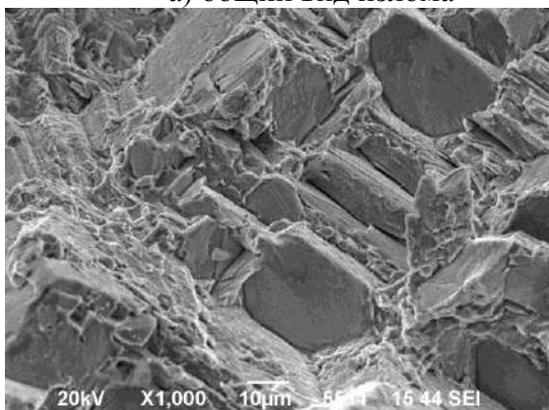
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.29 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,4\%$, $N=2961$ циклов

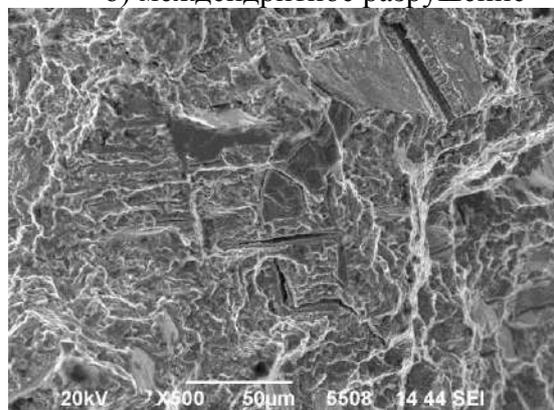
а) общий вид излома

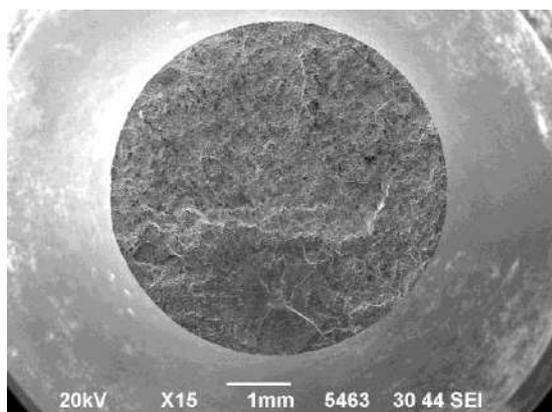


б) междендритное разрушение

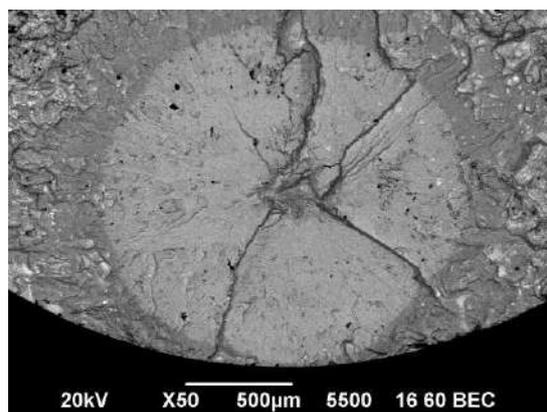


в) внутризеренное разрушение

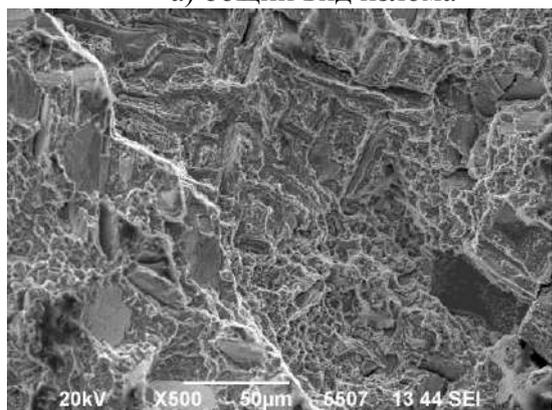
Рисунок 3.30 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,25\%$, $N=2268$ циклов



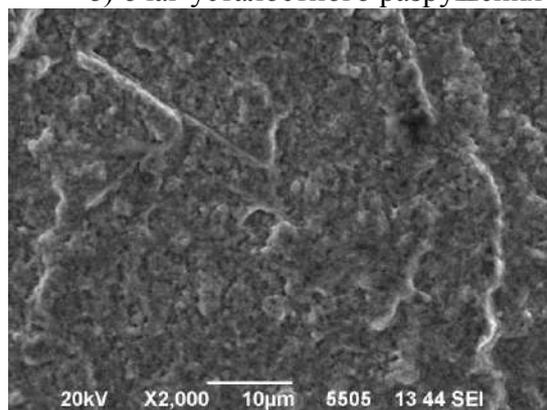
а) общий вид излома



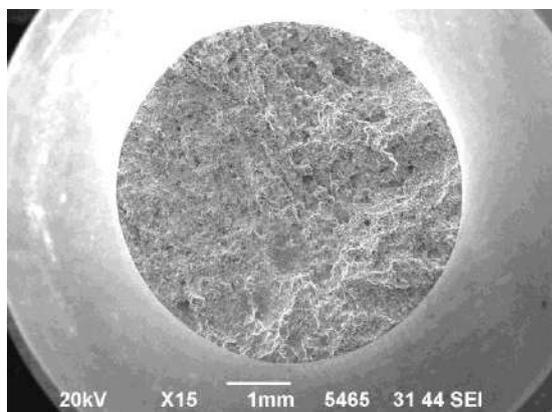
б) очаг усталостного разрушения



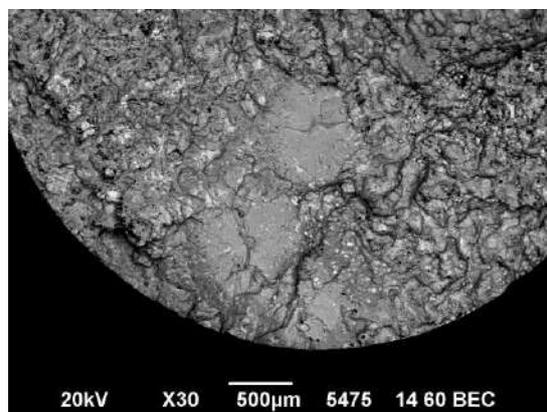
в) внутризеренное разрушение



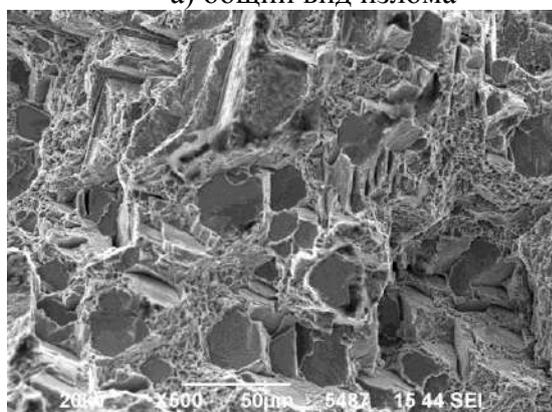
г) междендритное разрушение

Рисунок 3.31 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,2\%$, $N=39534$ циклов

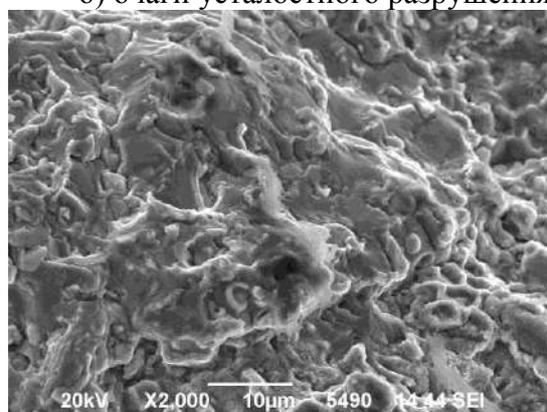
а) общий вид излома



б) очаги усталостного разрушения

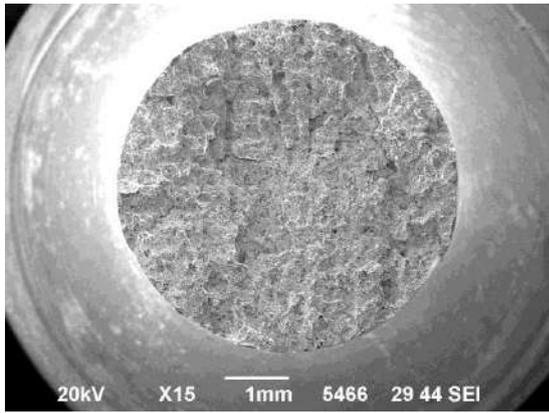


в) внутризеренное разрушение

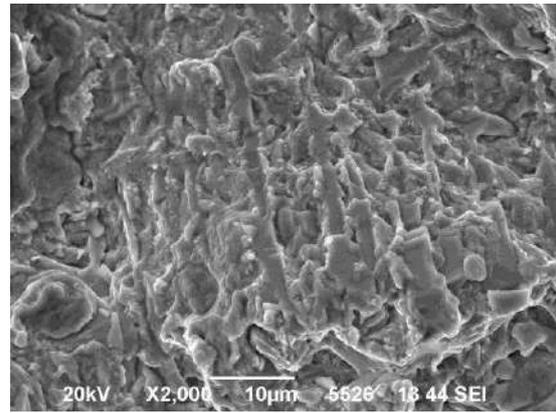


г) междендритное разрушение

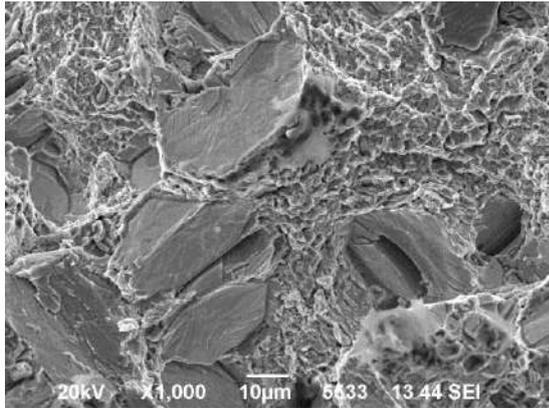
Рисунок 3.32 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\epsilon_a=0,25\%$, $N=1761$ циклов



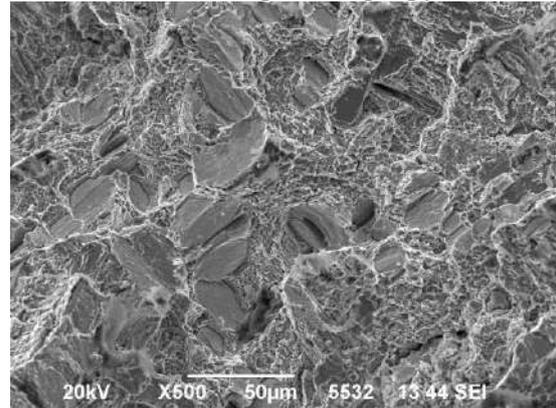
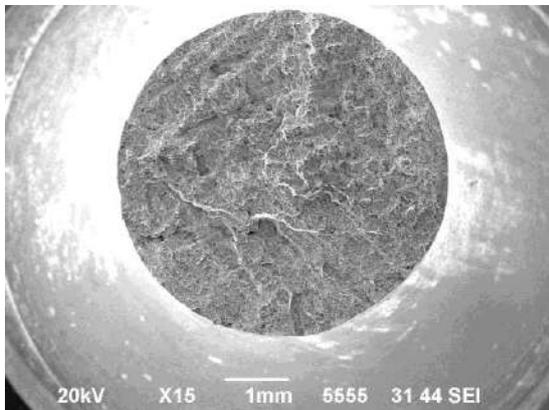
а) общий вид излома



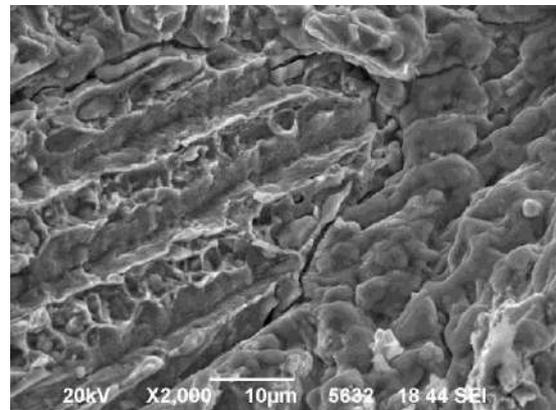
б) междендритное разрушение



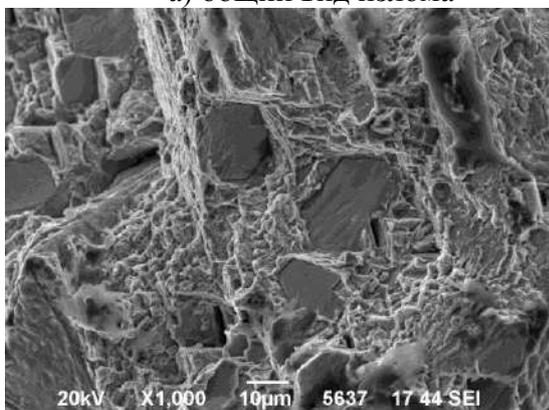
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.33 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\epsilon_a=0,15\%$, $N=40436$ циклов

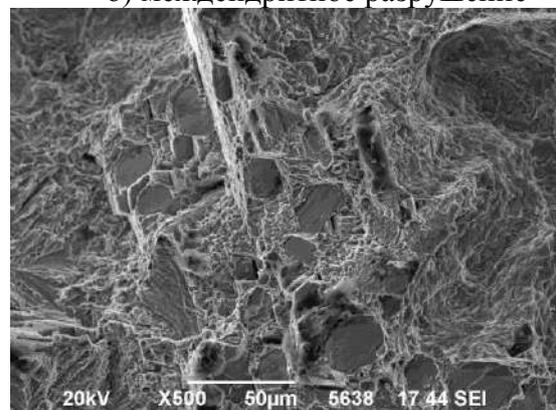
а) общий вид излома

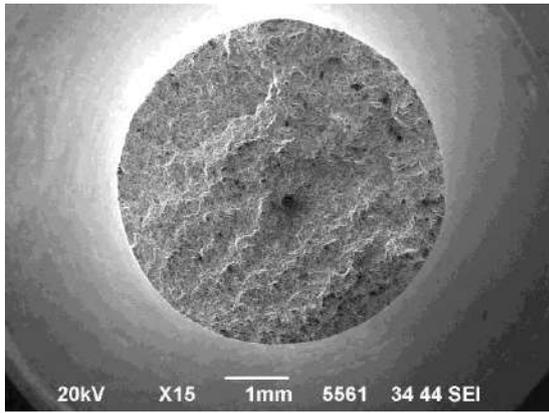


б) междендритное разрушение

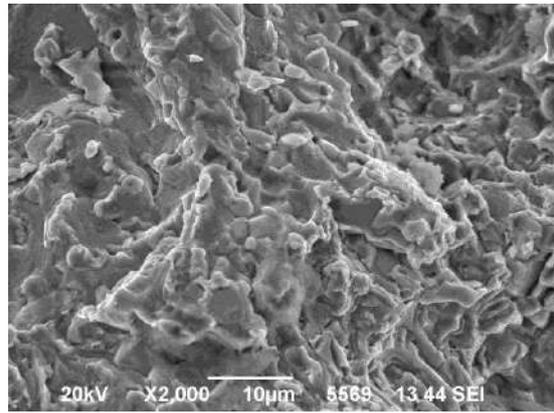


в) внутризеренное разрушение

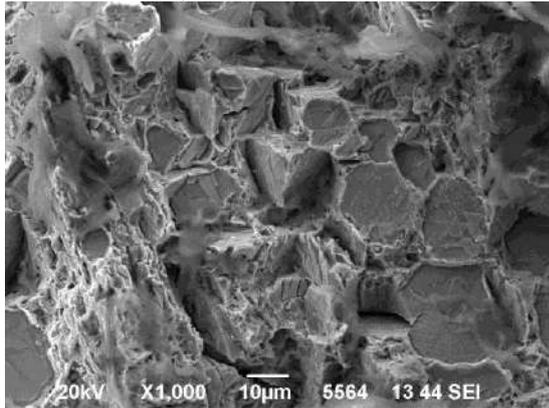
Рисунок 3.34 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\epsilon_a=0,15\%$, $N=7262$ циклов



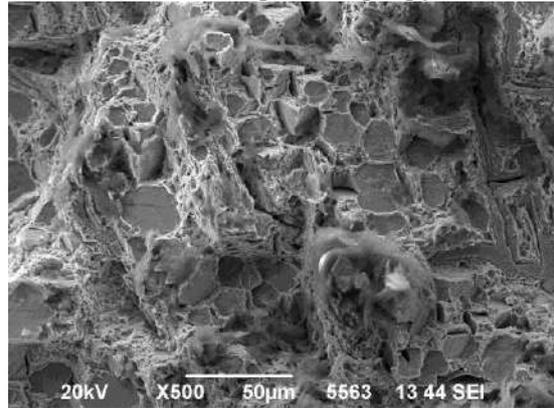
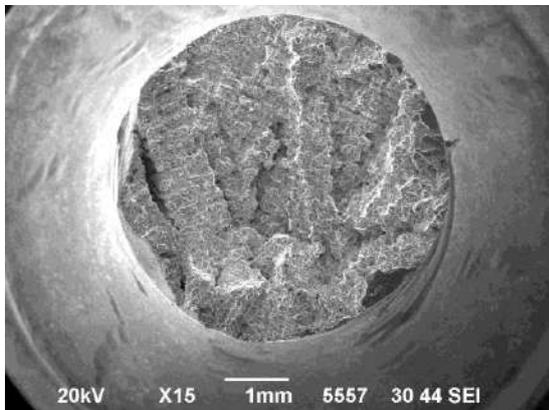
а) общий вид излома



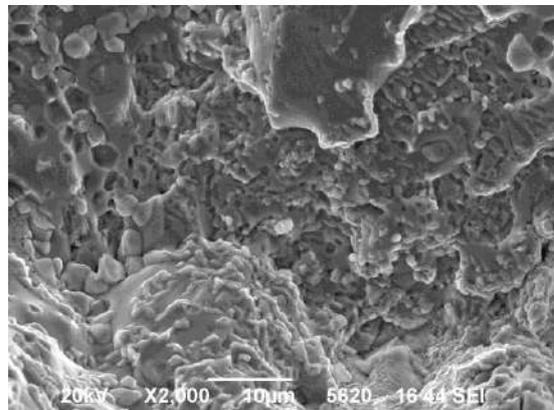
б) междендритное разрушение



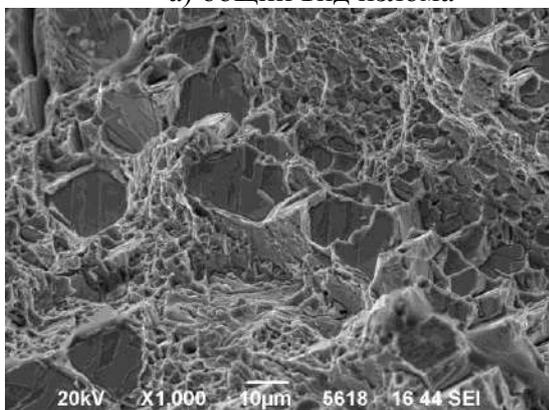
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.35 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\epsilon_a=0,125\%$, $N=19033$ циклов

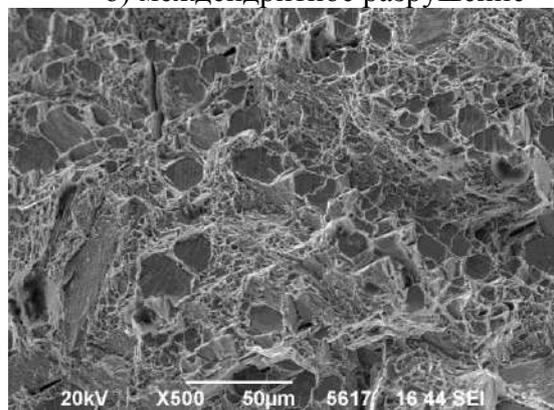
а) общий вид излома

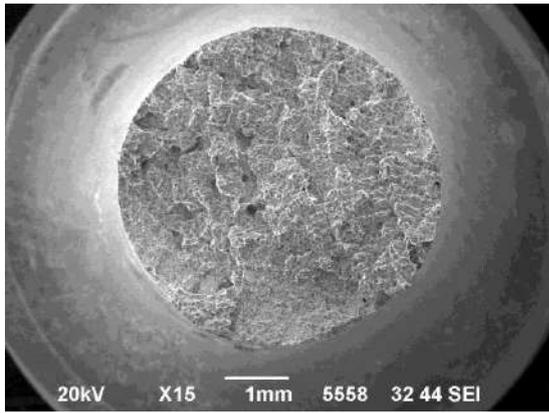


б) междендритное разрушение

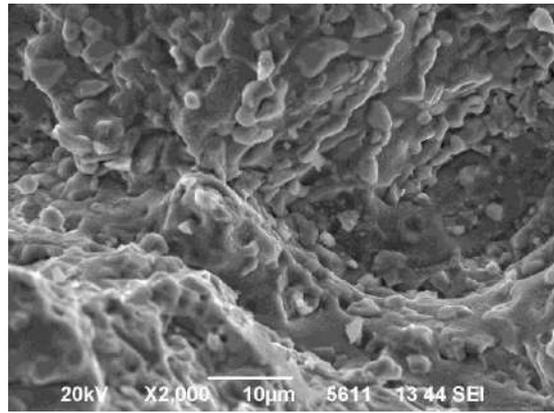


в) внутризеренное разрушение

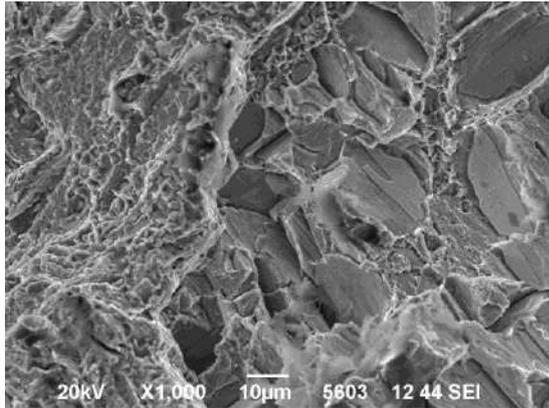
Рисунок 3.36 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\epsilon_a=0,2\%$, $N=2119$ циклов



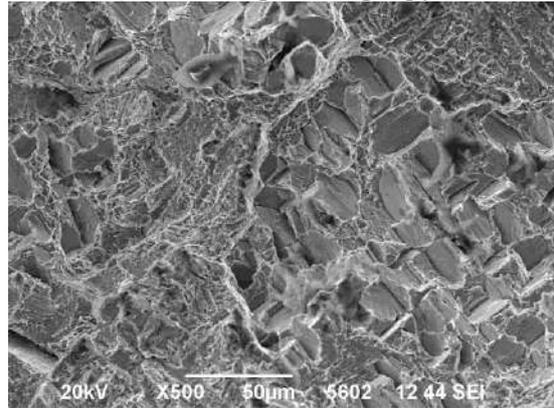
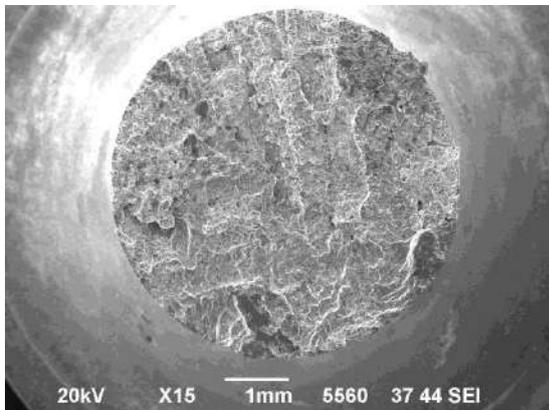
а) общий вид излома



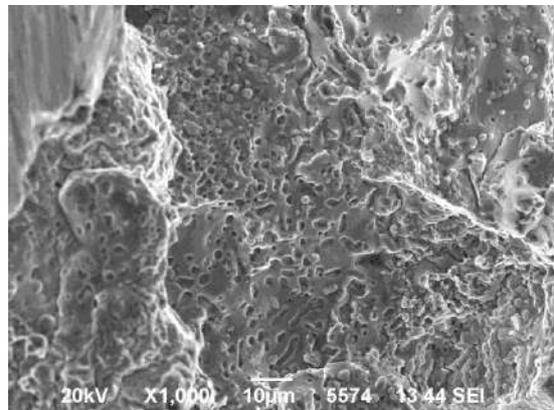
б) междендритное разрушение



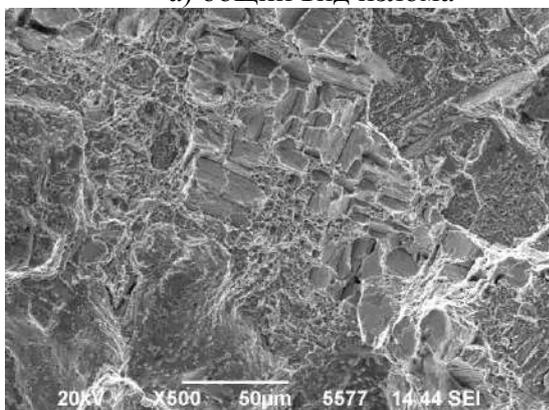
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.37 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\varepsilon_a=0,15\%$, $N=8061$ циклов

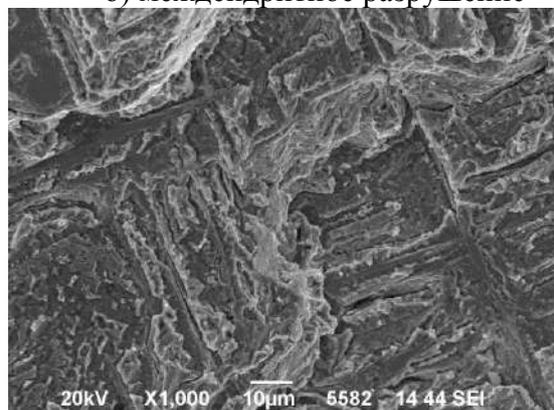
а) общий вид излома

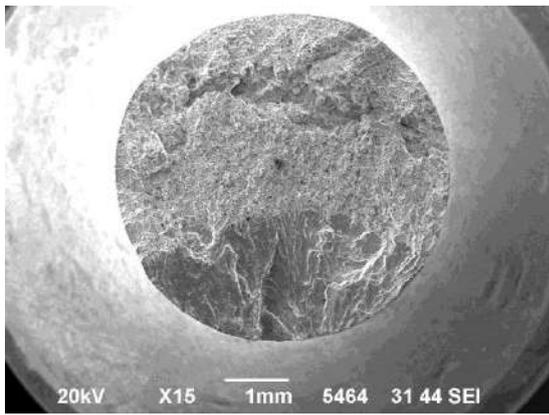


б) междендритное разрушение

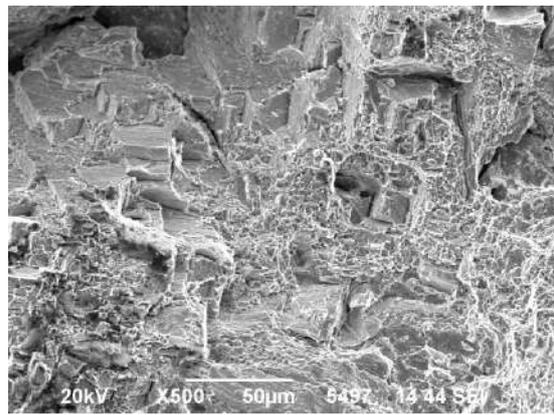


в) внутризеренное разрушение

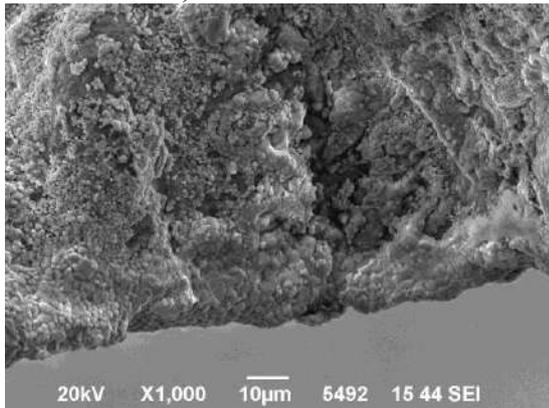
Рисунок 3.38 – Строение излома образца № 4913 (1050°C), «жесткий» цикл



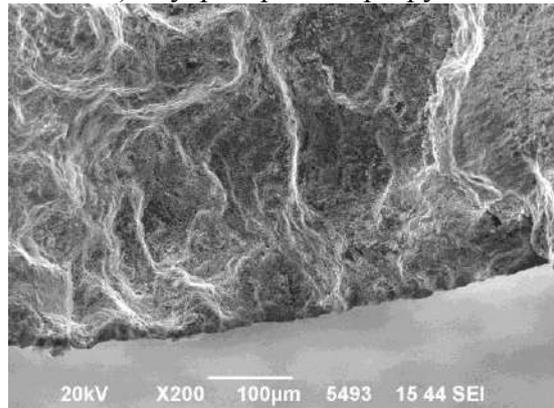
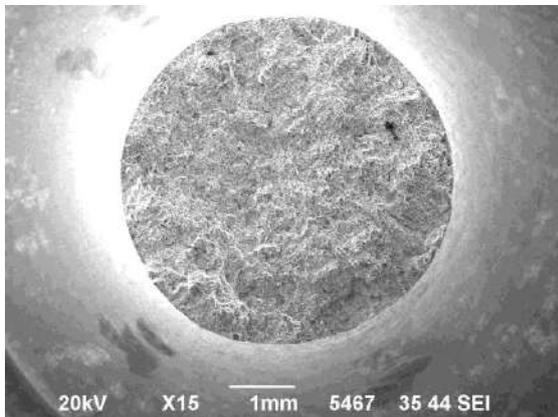
а) общий вид излома



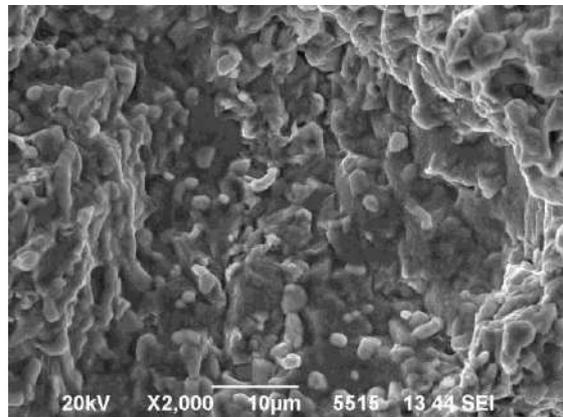
б) внутризеренное разрушение



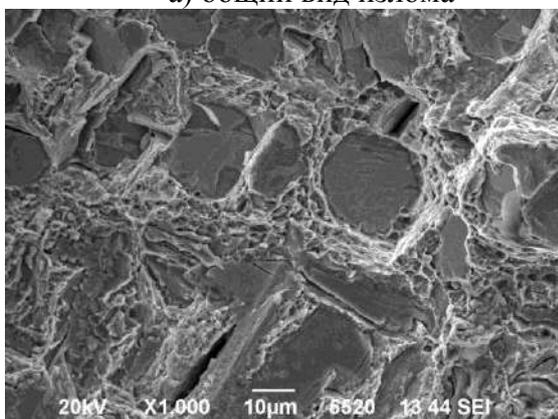
в) высокотемпературное окисление

Рисунок 3.39 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\varepsilon_a=0,025\%$, $N=1145$ циклов

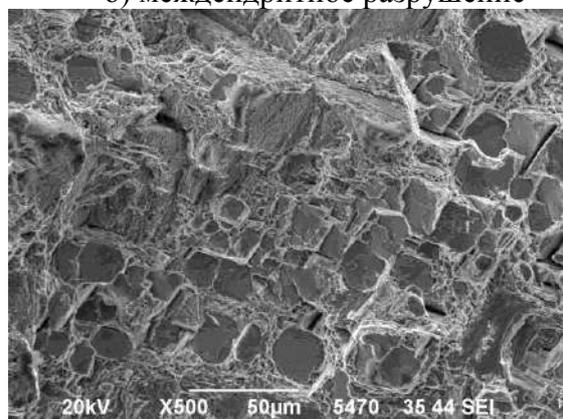
а) общий вид излома

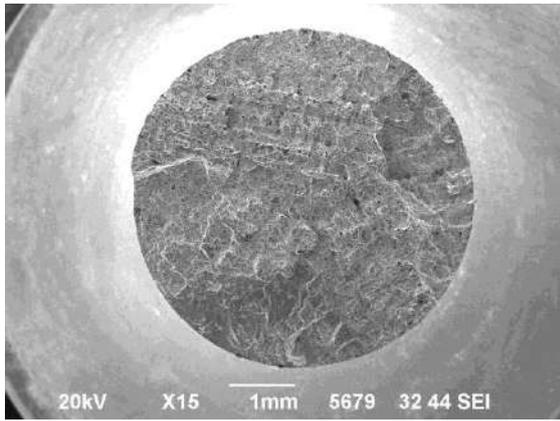


б) междендритное разрушение

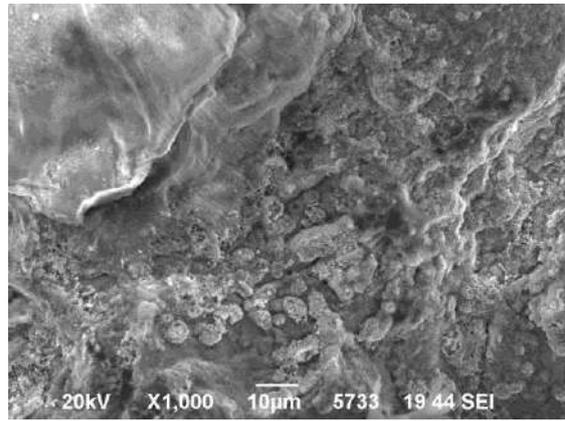


в) внутризеренное разрушение

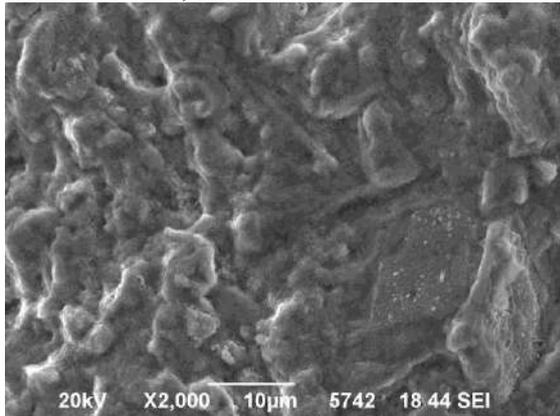
Рисунок 3.40 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\varepsilon_a=0,325\%$, $N=4428$ циклов



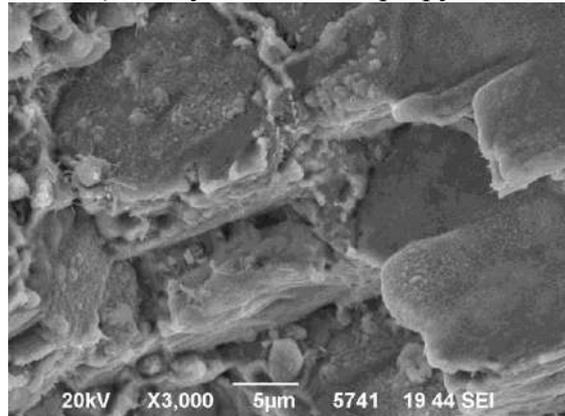
а) общий вид излома



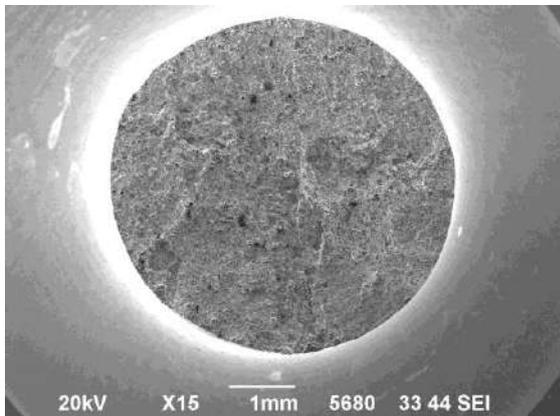
б) очаг усталостного разрушения



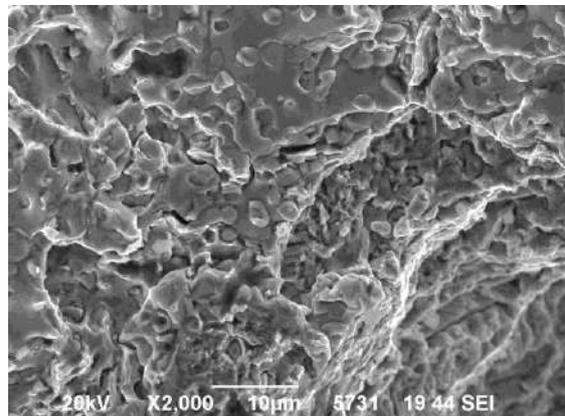
в) внутризеренное разрушение



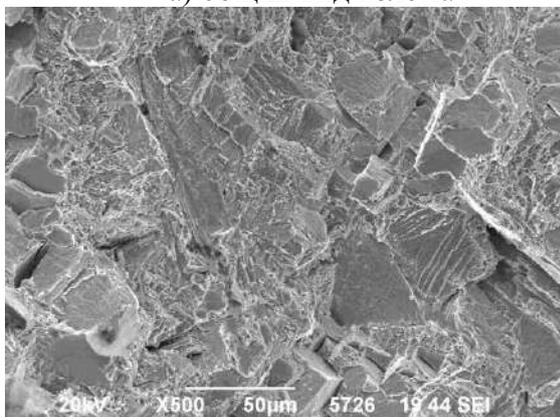
г) междендритное разрушение

Рисунок 3.41 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=510$ МПа, $N=19\,032$ цикла

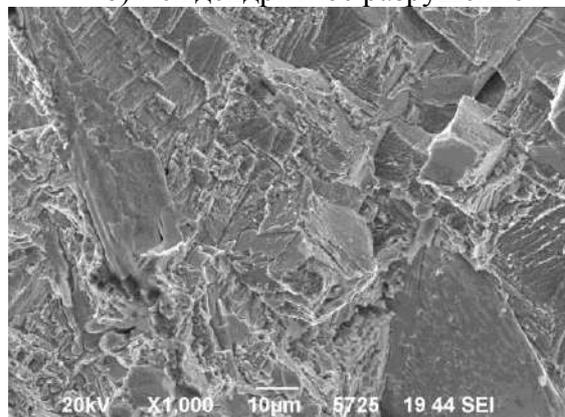
а) общий вид излома

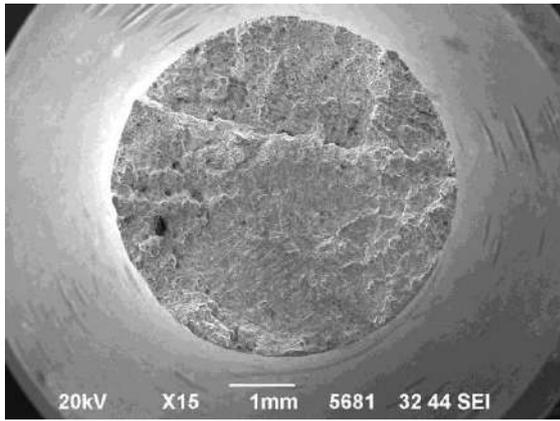


б) междендритное разрушение

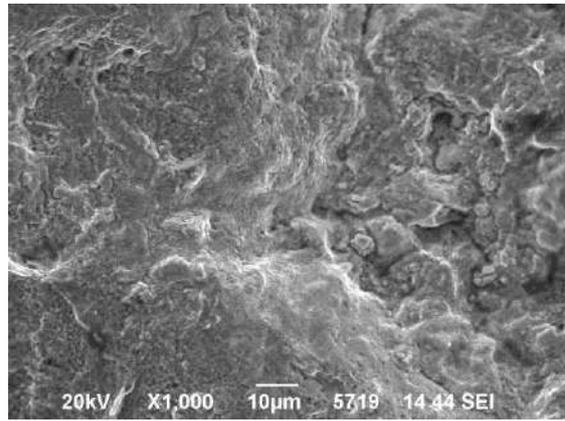


в) внутризеренное разрушение

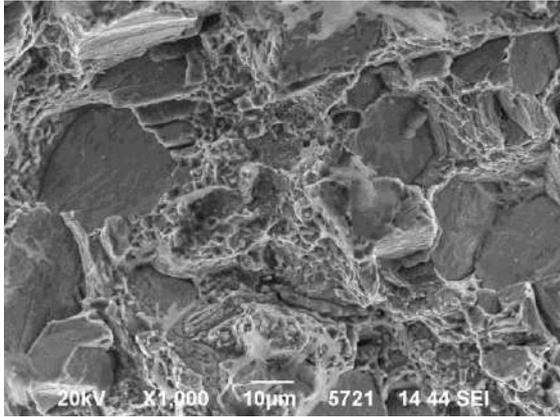
Рисунок 3.42 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=560$ МПа, $N=47\,216$ циклов



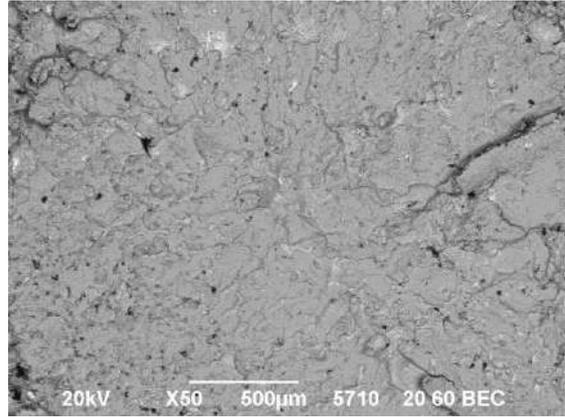
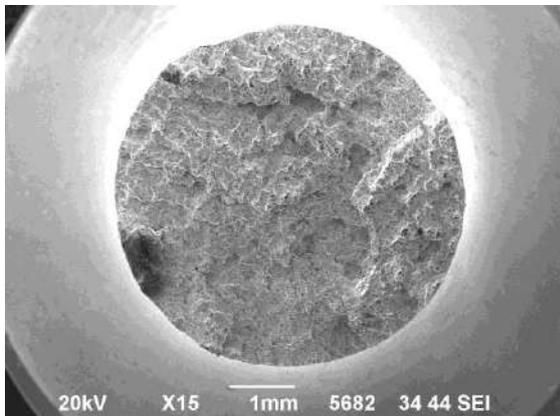
а) общий вид излома



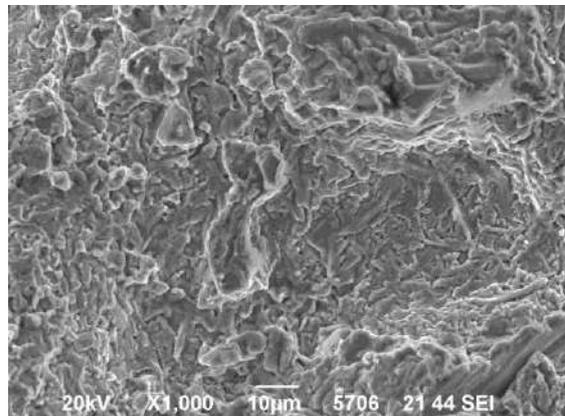
б) высокотемпературное окисление



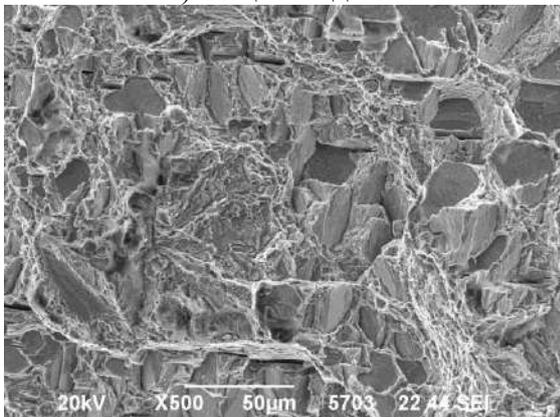
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.43 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=100$ МПа, $N=15672$ цикла

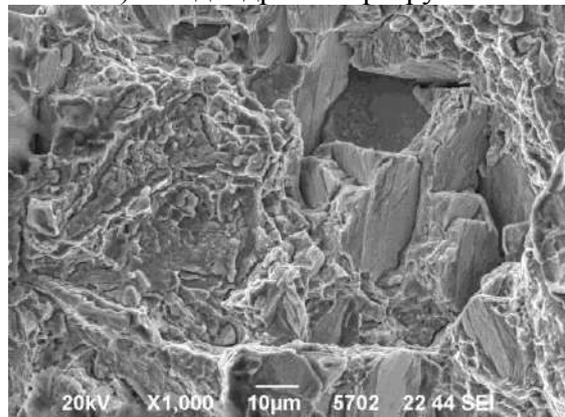
а) общий вид излома

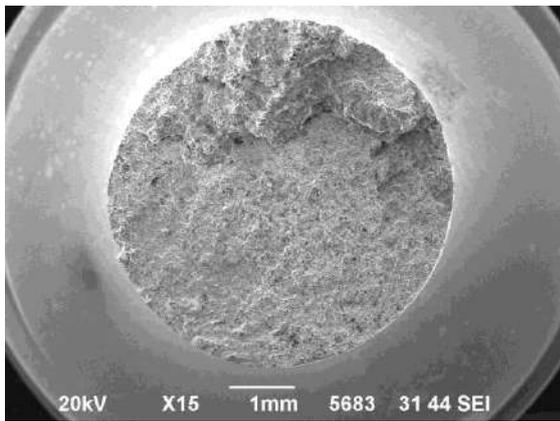


б) междендритное разрушение

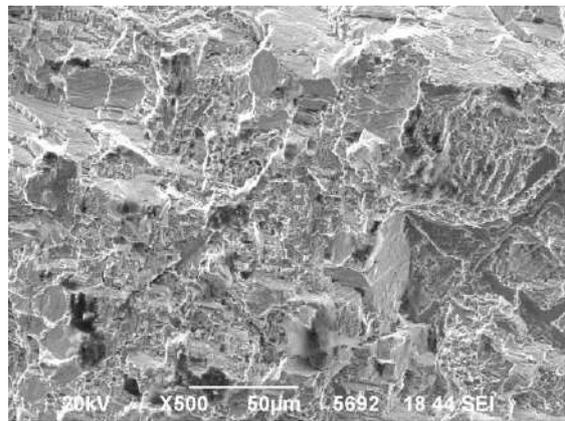


в) внутризеренное разрушение

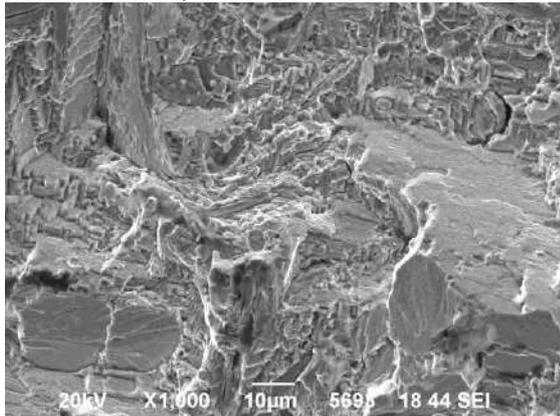
Рисунок 3.44 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=590$ МПа, $N=2694$ циклов



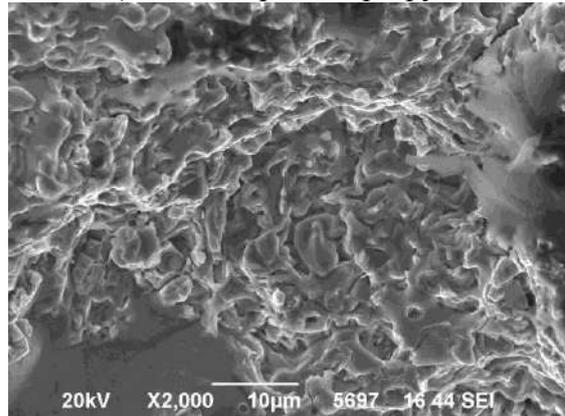
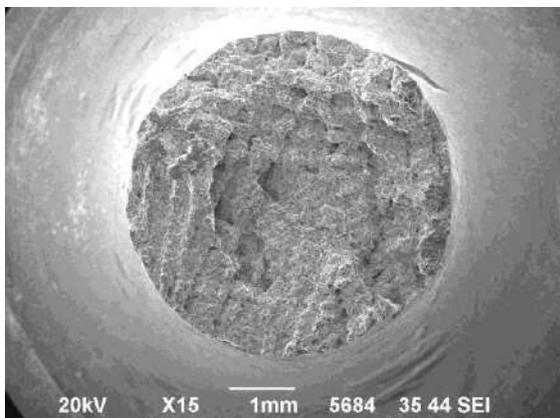
а) общий вид излома



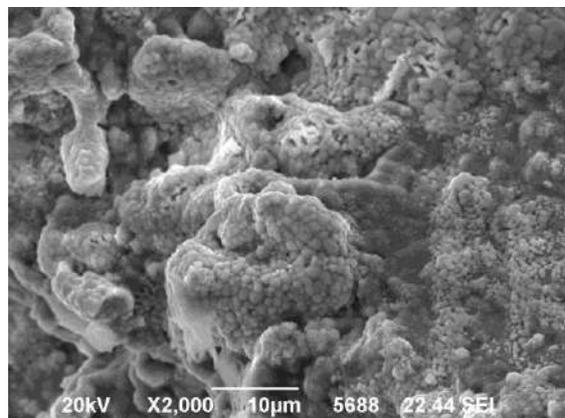
б) междендритное разрушение



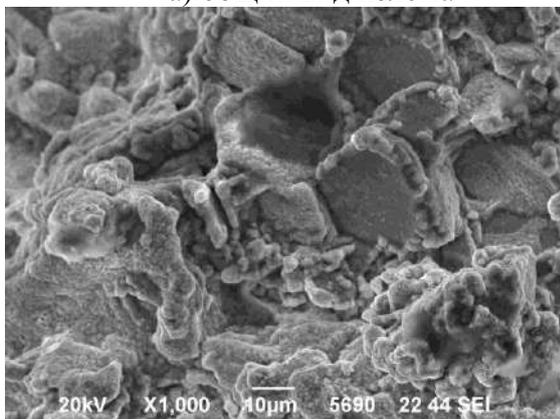
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.45 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=540$ МПа, $N=4384$ циклов

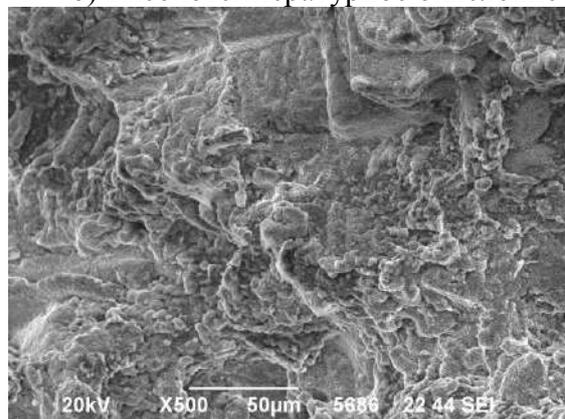
а) общий вид излома

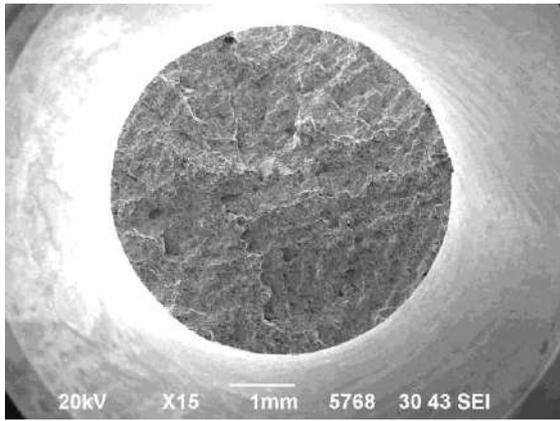


б) высокотемпературное окисление

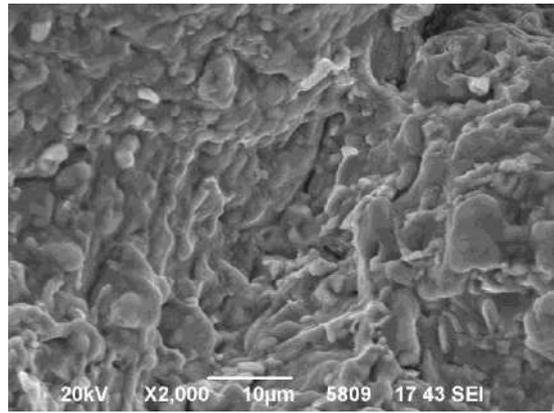


в) внутризеренное разрушение

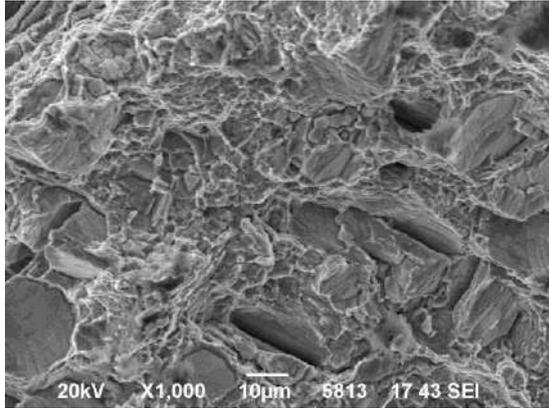
Рисунок 3.46 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=350$ МПа, $N=6901$ циклов



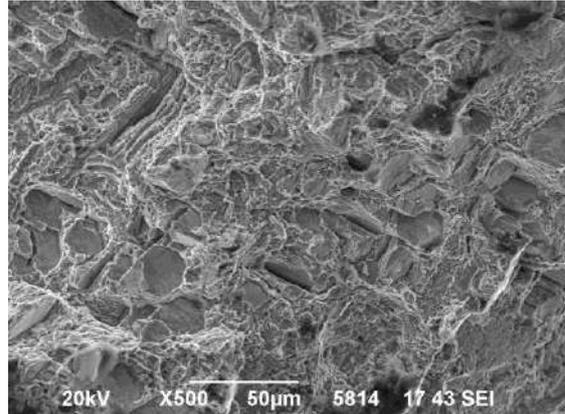
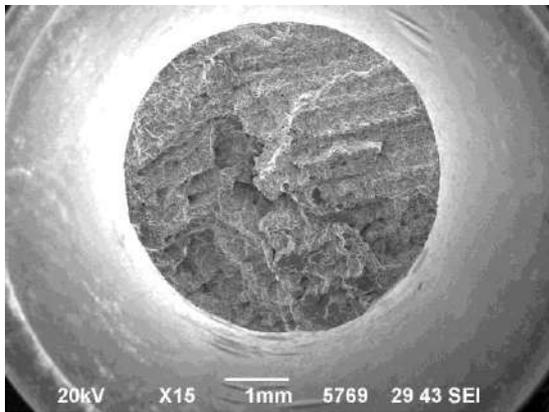
а) общий вид излома



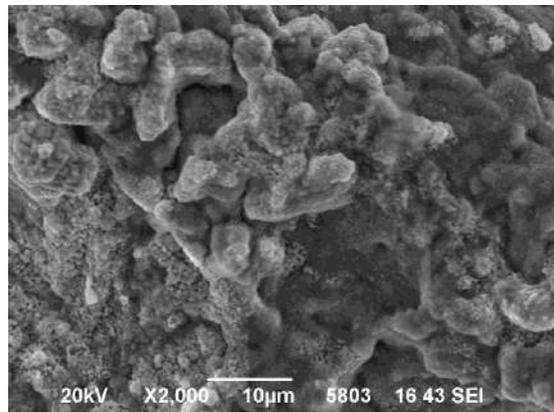
б) междендритное разрушение



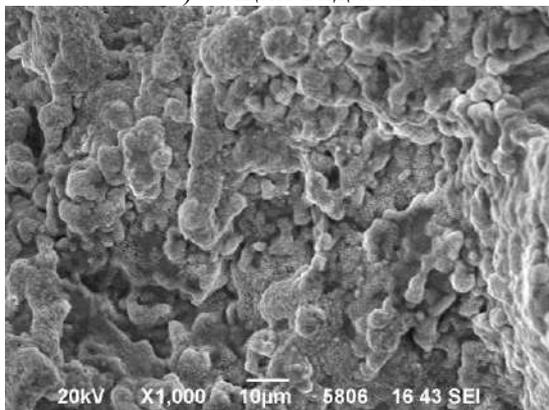
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.47 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=300$ МПа, $N=13355$ циклов

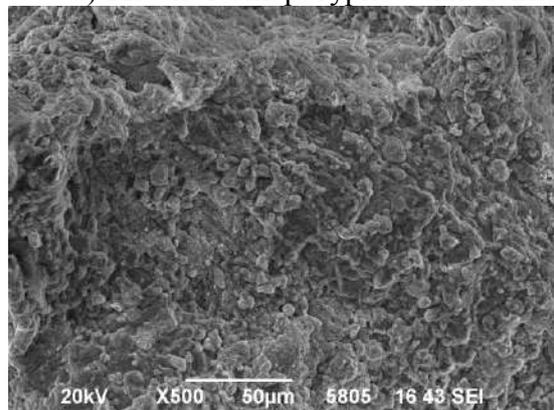
а) общий вид излома

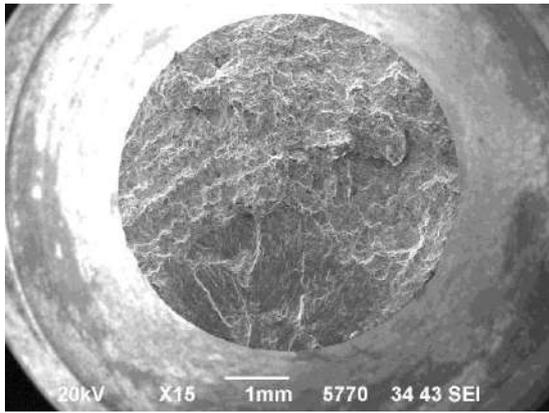


б) высокотемпературное окисление

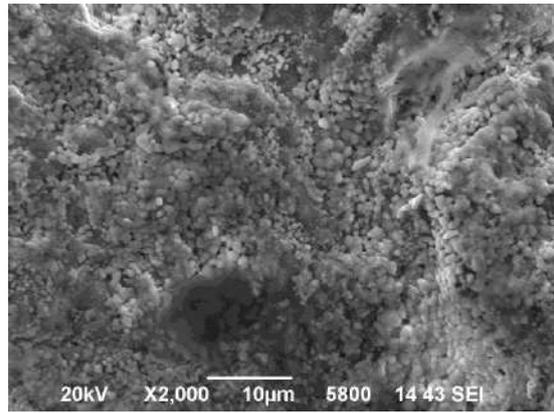


в) внутризеренное разрушение

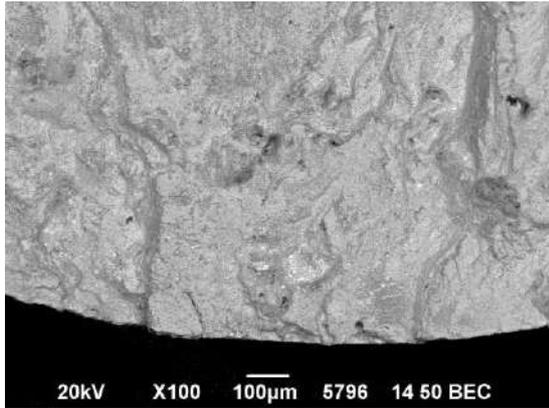
Рисунок 3.48 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=-1$, $\sigma_{\text{max}}=175$ МПа, $N=25834$ циклов



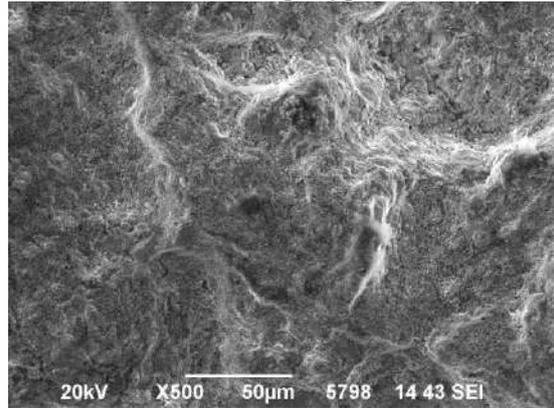
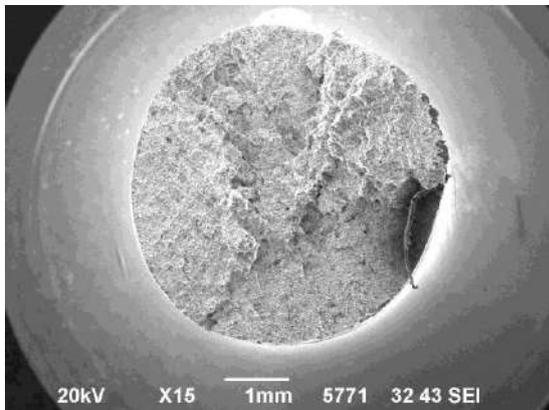
а) общий вид излома



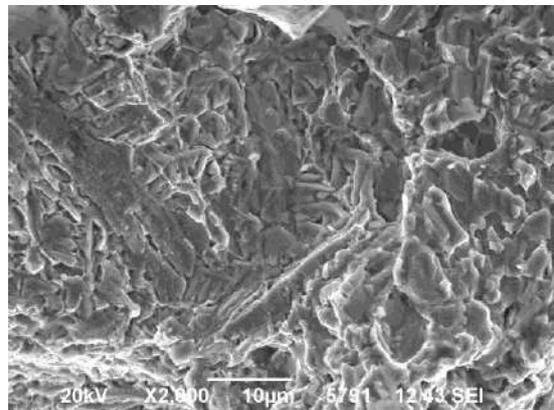
б) высокотемпературное окисление



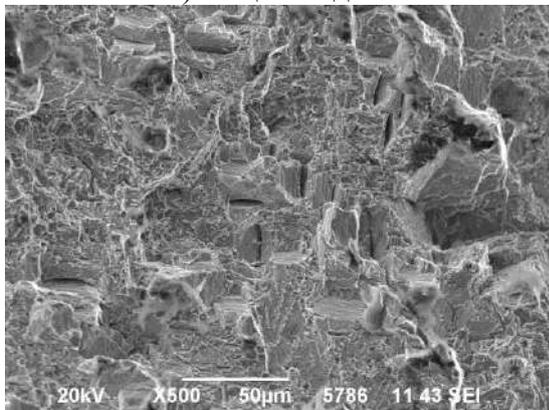
в) очаг усталостного разрушения

Рисунок 3.49 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=250$ МПа, $N=19742$ циклов

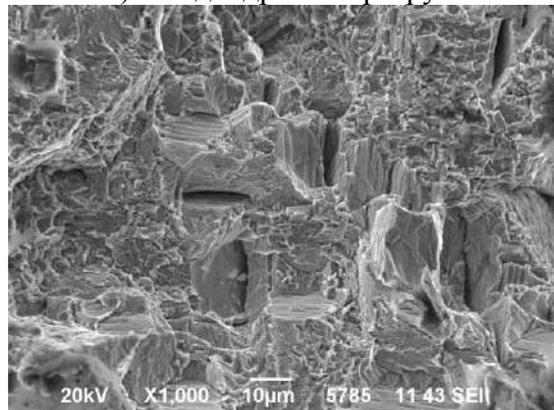
а) общий вид излома

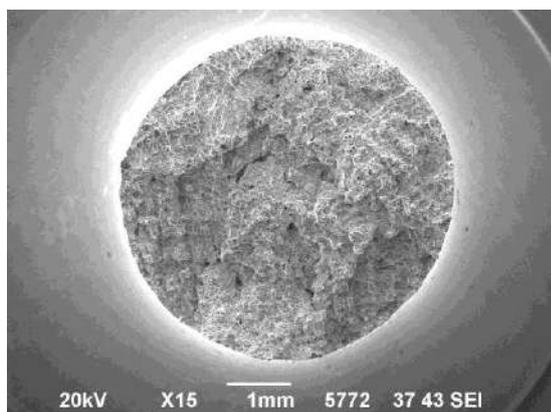


б) междендритное разрушение

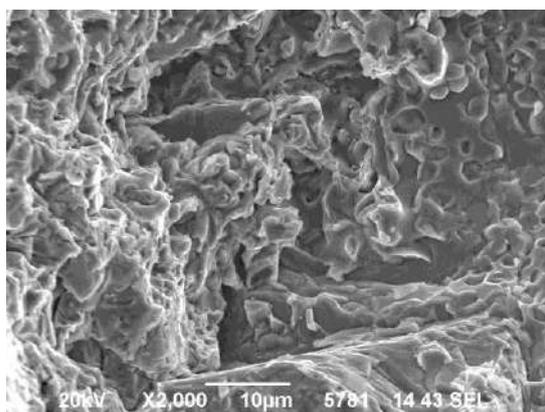


в) внутризеренное разрушение

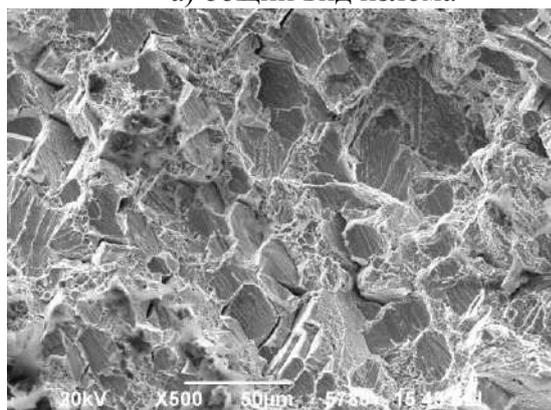
Рисунок 3.50 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=540$ МПа, $N=21818$ циклов



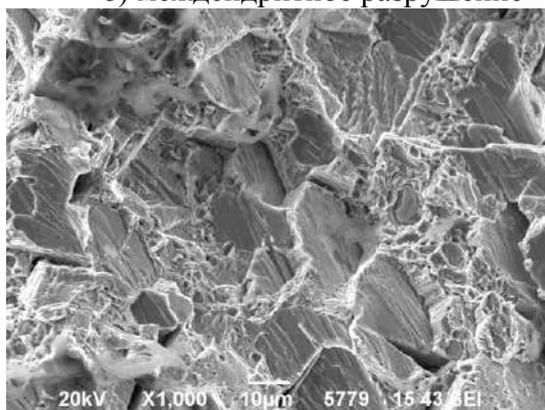
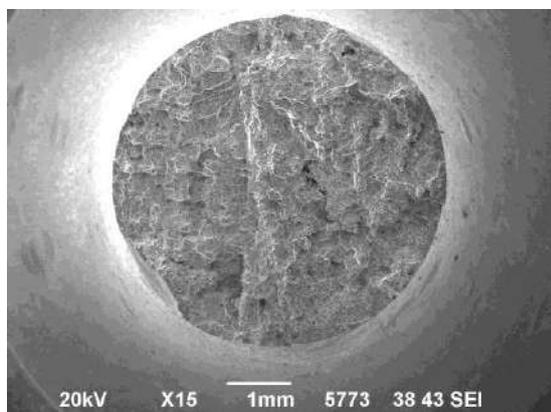
а) общий вид излома



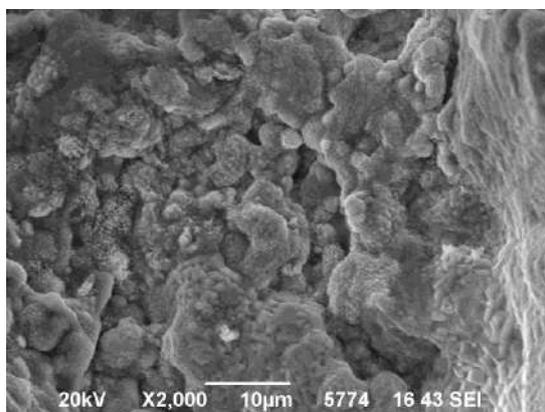
б) междендритное разрушение



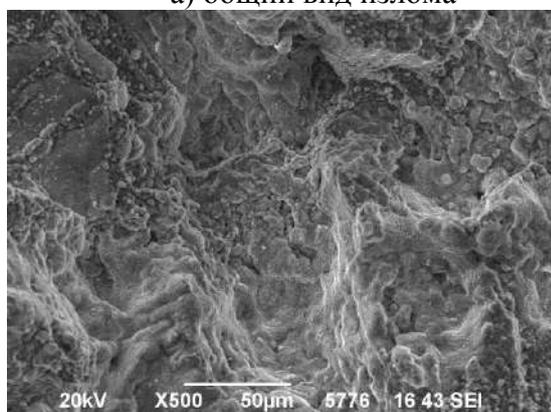
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.51 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=270$ МПа, $N=18046$ циклов

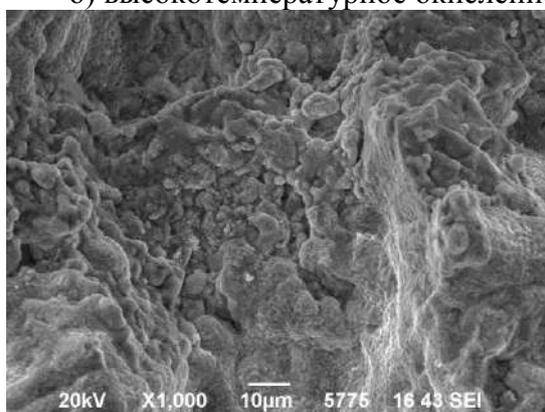
а) общий вид излома

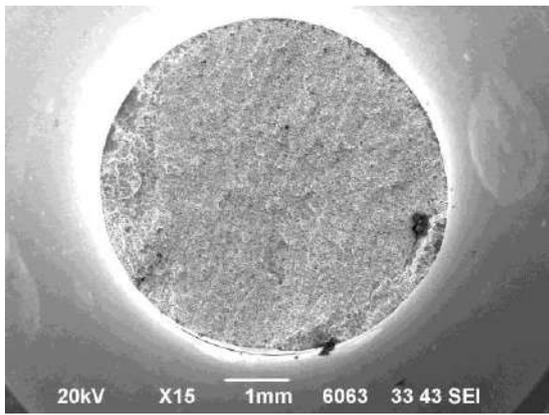


б) высокотемпературное окисление

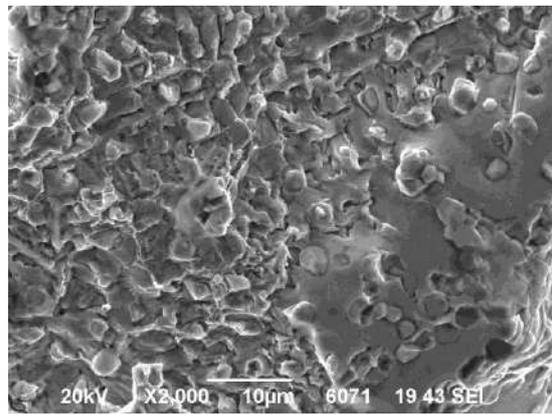


в) внутризеренное разрушение

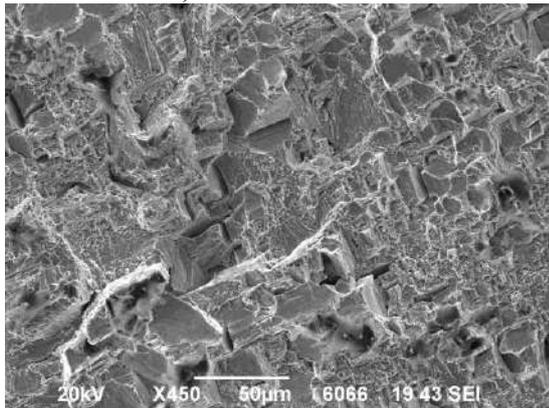
Рисунок 3.52 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=1050^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=250$ МПа, $N=2239$ циклов



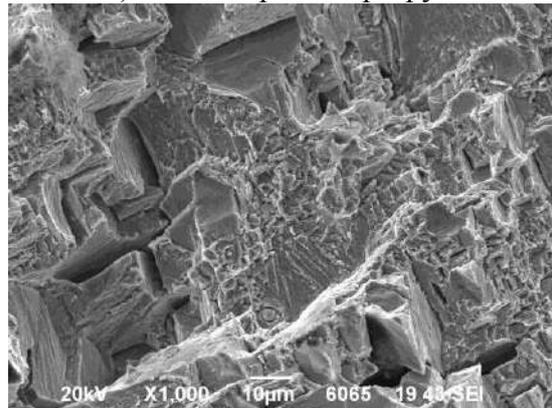
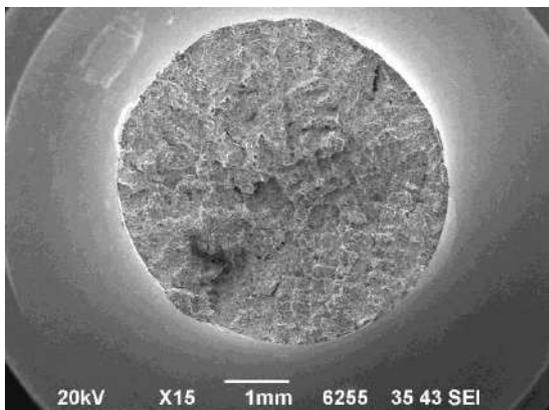
а) общий вид излома



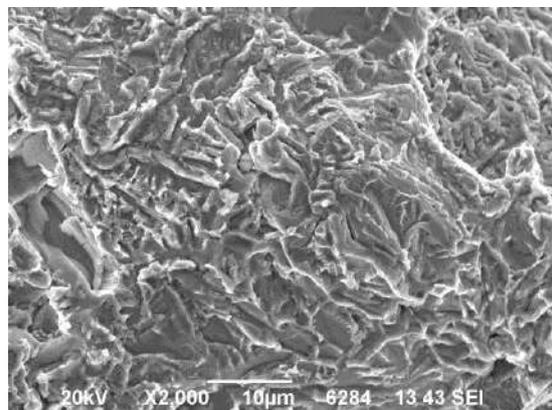
б) междендритное разрушение



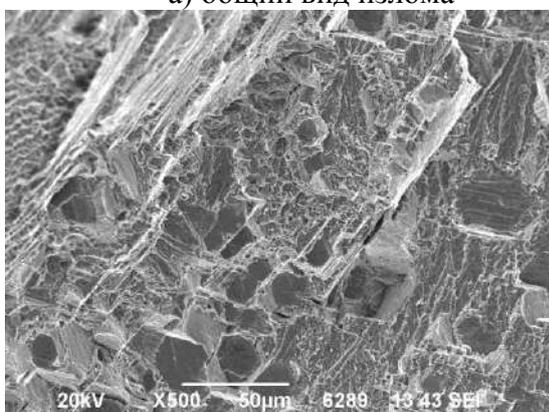
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.53 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=320$ МПа, $N=2739$ циклов

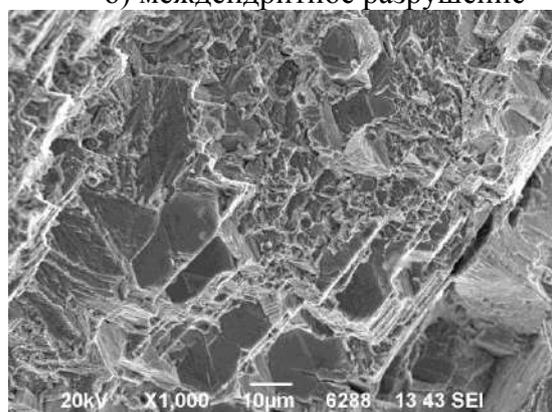
а) общий вид излома

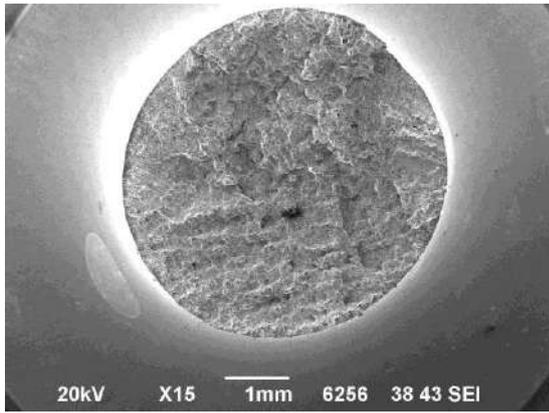


б) междендритное разрушение

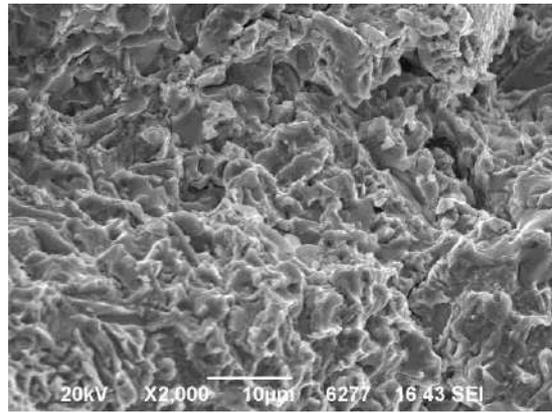


в) внутризеренное разрушение

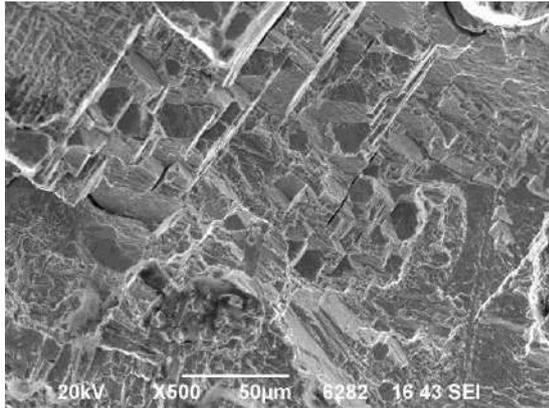
Рисунок 3.54 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=580$ МПа, $N=62758$ циклов



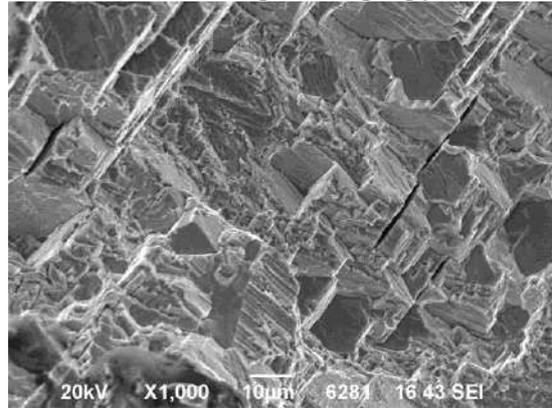
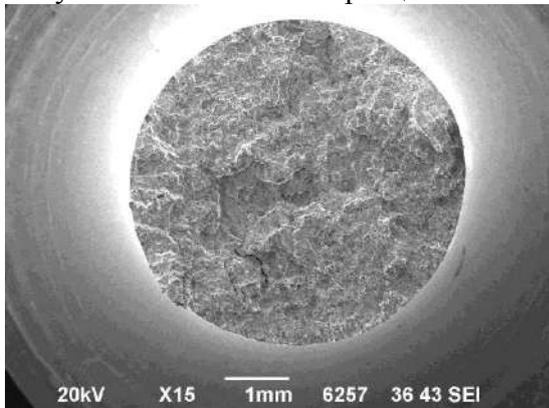
а) общий вид излома



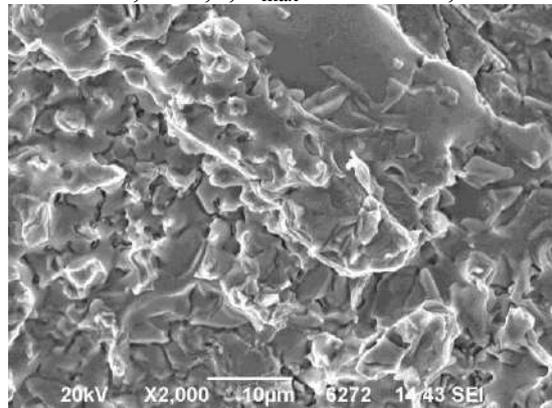
б) междендритное разрушение



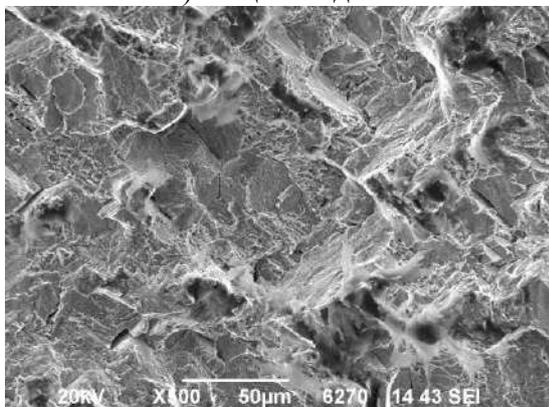
в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.55 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$, $R=0,5$, $\sigma_{\text{max}}=640$ МПа, $N=12425$ циклов

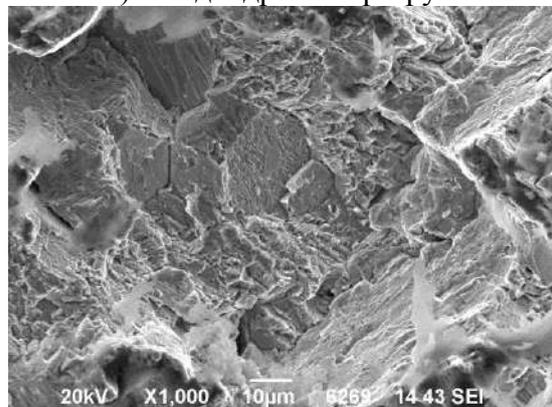
а) общий вид излома



б) междендритное разрушение



в) внутризеренное разрушение

Рисунок 3.56 – Излом образца ВКНА-1ВР при $T=20^{\circ}\text{C}$, $R=0$, $\sigma_{\text{max}}=300$ МПа, $N=2966$ циклов

3.3. Заключение по третьей главе

Исследованы изломы образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР после испытаний на малоцикловую усталость при контроле нагрузки и деформации в цикле при различных температурах и коэффициентах асимметрии цикла нагружения.

В результате фрактографического анализа ВКНА-1ВР установлено, что разрушение развивается по границам дендритов либо внутризеренно с формированием вязких ямок по матрице и фасеток скола по упрочняющей и карбидной фазам. Это наблюдается и при 20, и при 850, и при 1050 градусах вне зависимости от режима нагружения и коэффициента асимметрии. Также следует отметить отсутствие усталостных бороздок на всех исследованных образцах. Очаг усталостного разрушения явно выражен только на некоторых из исследованных образцов. На изломах испытанных при повышенной температуре образцов обнаружено высокотемпературное окисление.

При комнатной температуре при мягком симметричном и отнулевом циклах нагружения образцов из ВЖ175 усталостное разрушение развивается с формированием усталостных бороздок, а очаг разрушения представлен фасетками скола. Повышение асимметрии цикла нагружения до 0,5 приводит к изменению строения зоны усталостного развития трещины на фасетчатый. При 650°C наблюдается похожая картина, но при высокой асимметрии цикла ($R=0,5$) и очаг и зона усталостного развития трещины представлены смешанным изломом (межзеренное и внутризеренное с фасетками скола). При 750 °C при симметричном цикле нагружение разрушение развивается от фасеток скола, а зона усталостного развития трещины представлена смешанным изломом. При отнулевом цикле нагружения и очаг и зона усталостного развития трещины представлены смешанным изломом. При $R=0,5$ и очаг, и зона развития трещины представлены межзеренным разрушением. На всех образцах, кроме одного, очаги разрушения расположены вблизи поверхности. Статический долом во всех случаях представлен мелкоямочным рельефом по вязкой матрице и фасетками скола по карбидной фазе.

При «жестком» цикле при комнатной температуре наблюдается в основном вязкий характер разрушения с наличием типичного бороздчатого механизма распространения трещины, при повышенных температурах – смешанный механизм разрушения: вязкий и квазихрупкий. Наблюдаемое можно объяснить снижением пластичности ВЖ175 при повышении температуры. Существенных отличий между изломами образцов, испытанных при симметричном и несимметричном жестком цикле, выявлено не было.

Как показано на рисунке 3.57, для образцов из сплава ВЖ175, испытанных при повышенной температуре при «мягком» нагружении наблюдается связь механизма разрушения с циклическим поведением материала. При симметричном цикле нагружения наблюдается классический усталостный механизм разрушения с формированием бороздок, а размах

деформации остается постоянным на протяжении испытания. При наличии асимметрии цикла ($R=0$) механизм сменяется на смешанный – наблюдаются и фасетки скола, и бороздки, при этом наблюдается трехстадийная циклическая ползучесть. При повышении асимметрии цикла увеличивается интенсивность накопления деформации циклической ползучести, а механизм разрушения сменяется на более свойственный для статической ползучести – фасетки, межзеренное или внутризеренное разрушение и отсутствие усталостных бороздок.

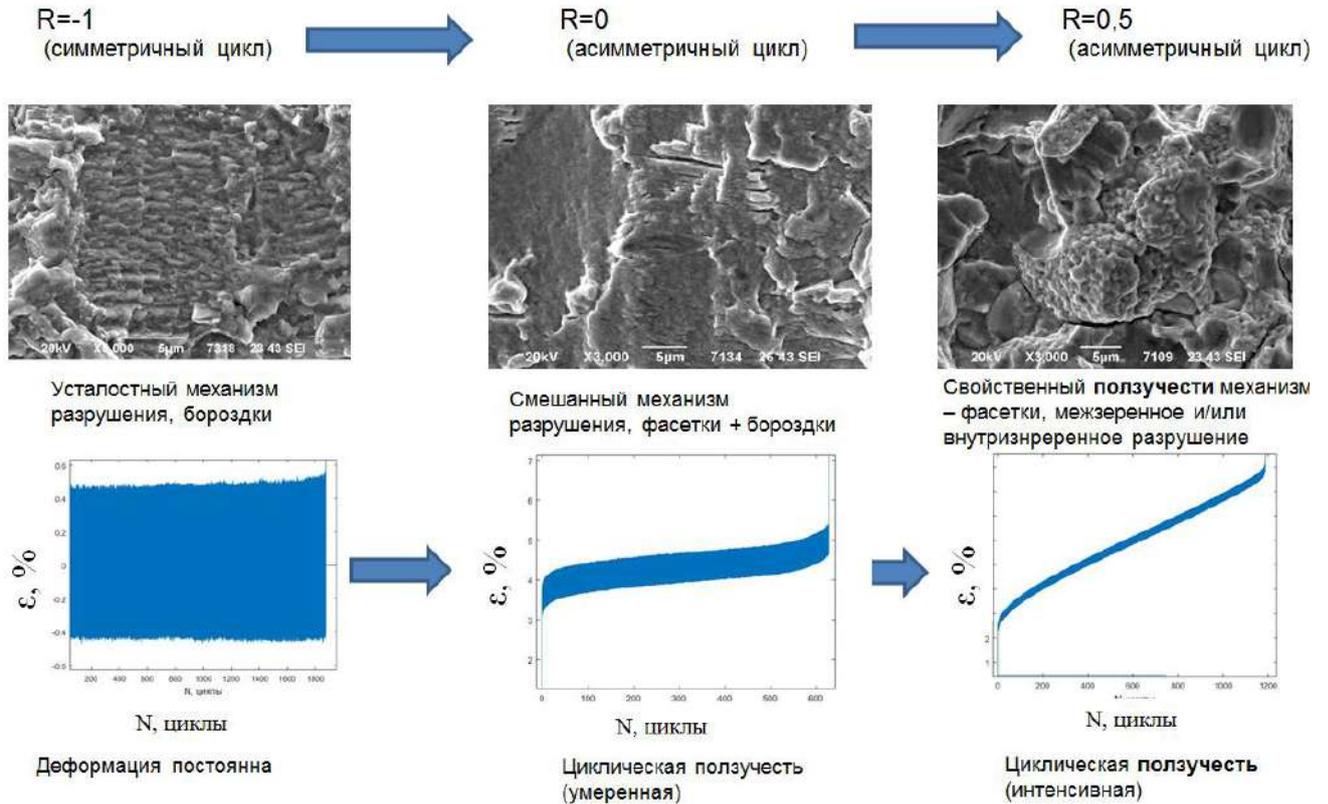


Рисунок 3.57 – зависимость механизма разрушения и циклической ползучести от асимметрии мягкого цикла нагружения для образцов из ВЖ175 при 650 °С

4. МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ

4.1. Влияние условий нагружения на пределы выносливости

Для аппроксимации зависимости числа циклов до разрушения от заданной деформации или заданного напряжения, в соответствии с рекомендациями РЦ АП-33.15-1, могут быть использованы степенная и экспоненциальная модели:

$$N_f = A \cdot \Delta \varepsilon^B; N_f = C \cdot \Delta \sigma^D, \quad (4.1)$$

$$N_f = \alpha \cdot \exp(\beta \Delta \varepsilon); N_f = \gamma \cdot \exp(\delta \Delta \sigma), \quad (4.2)$$

где N_f – число циклов до разрушения, $\Delta \varepsilon$ – размах полной деформации, $\Delta \sigma$ – размах напряжения, $A, B, C, D, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты.

В процессе обработки результатов испытаний было выявлено, что для большинства испытаний аппроксимация уравнением (4.1) характеризуется меньшим среднеквадратичным отклонением (далее СКО) экспериментальных результатов от линии регрессии:

$$S(\lg N) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N_i})^2}, \quad (4.2)$$

где n – количество экспериментальных точек $\lg N_i$ – экспериментальные логарифмы долговечностей, $\overline{\lg N_i}$ – логарифмы долговечностей, определенные по регрессионной зависимости для заданного уровня напряжения или деформации.

Поэтому было принято решение для аппроксимации экспериментальных данных использовать степенную модель (4.1). После логарифмирования обеих частей уравнения была получена линейная зависимость:

$$\lg N_f = a + b \lg \Delta \varepsilon; \lg N_f = c + d \cdot \lg \Delta \sigma, \quad (4.3)$$

где a, b, c, d – коэффициенты регрессии.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при девяти режимах испытаний (трех температурах: 20 °С, 650 °С, 750 °С для ВЖ175 и 20 °С, 850 °С, 1050 °С для ВКНА-1ВР; трех коэффициентах асимметрии: $R = 0, R = 0.5, R = -1$), были построены линии средних значений $\lg N_f$, соответствующие вероятности разрушения 50%. Также определены коэффициенты линейной регрессии a и b , средние значения предела МЦУ на базе 10^4 циклов и СКО (таблица 4.1 для «жесткого» цикла нагружения и таблица 4.2 для «мягкого» цикла нагружения) [10].

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены кривые усталости для сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 соответственно в двойных логарифмических координатах.

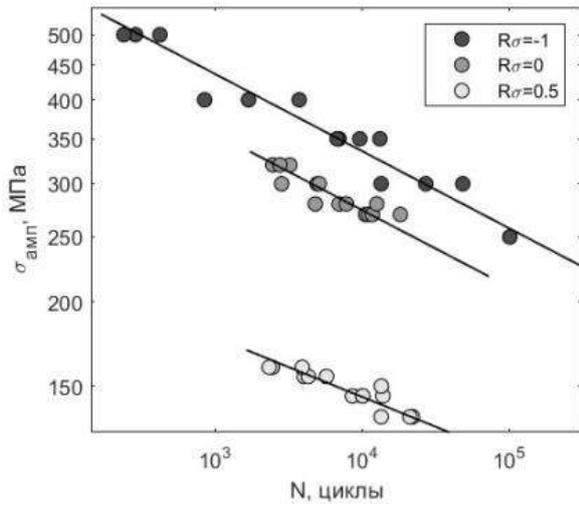
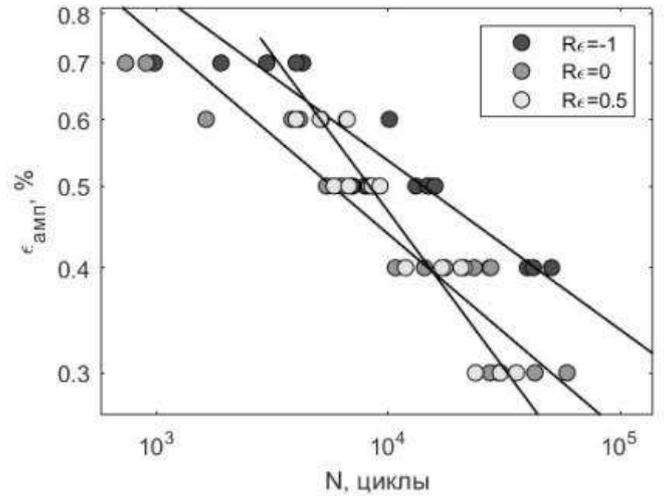
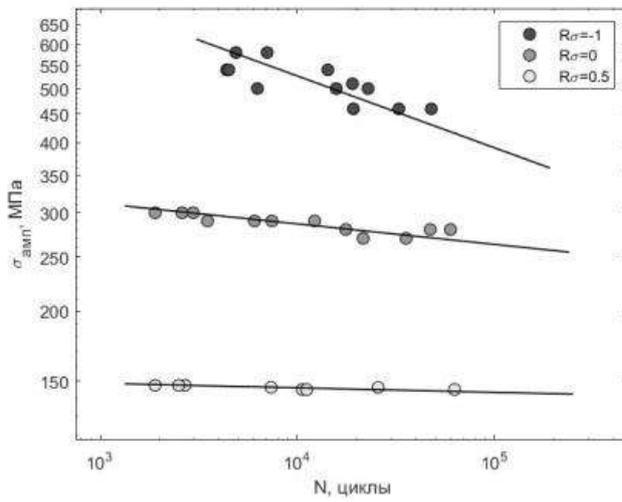
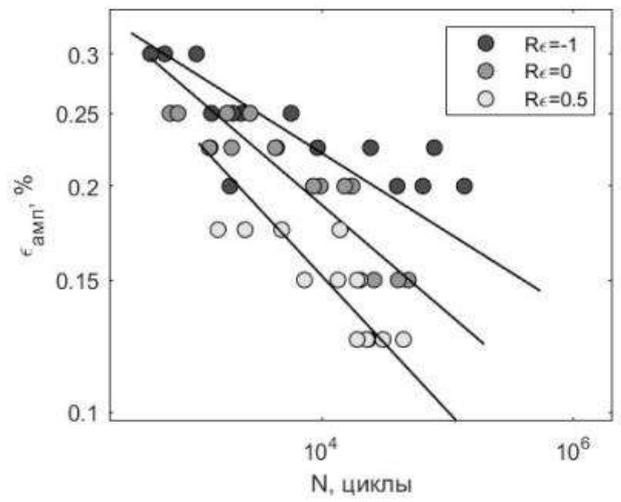
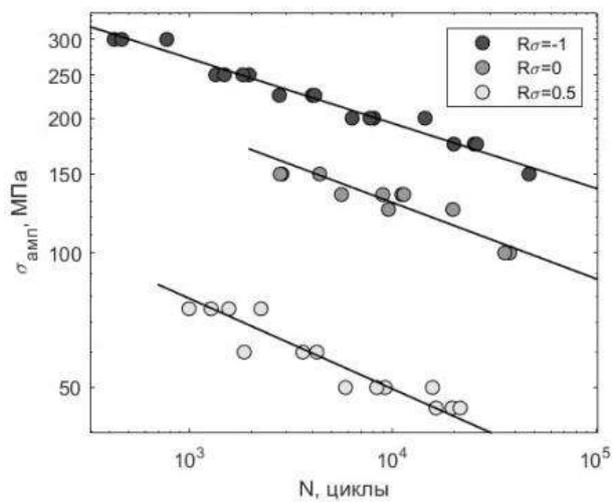
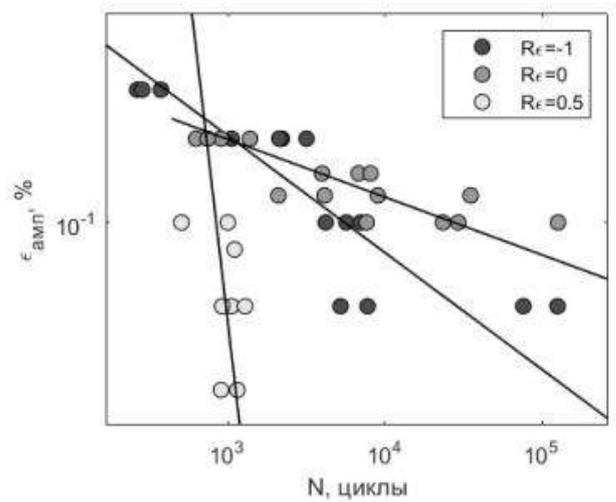
а) $T=20^{\circ}\text{C}$, «мягкий» циклб) $T=20^{\circ}\text{C}$, «жесткий» циклв) $T=850^{\circ}\text{C}$, «мягкий» циклг) $T=850^{\circ}\text{C}$, «жесткий» циклд) $T=1050^{\circ}\text{C}$, «мягкий» цикле) $T=1050^{\circ}\text{C}$, «жесткий» цикл

Рисунок 4.1 - Кривые усталости ВКНА-1ВР

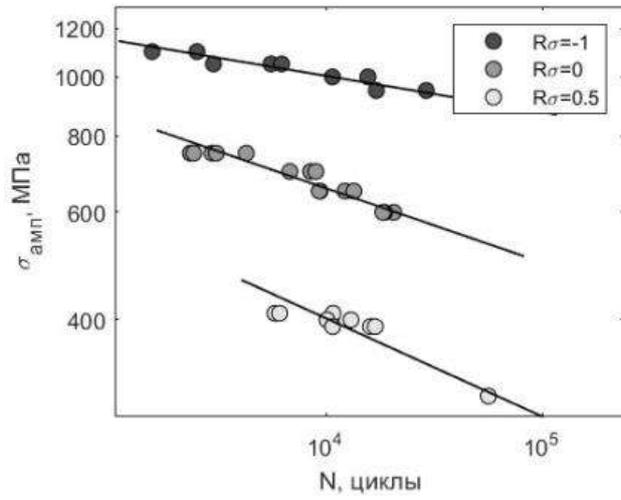
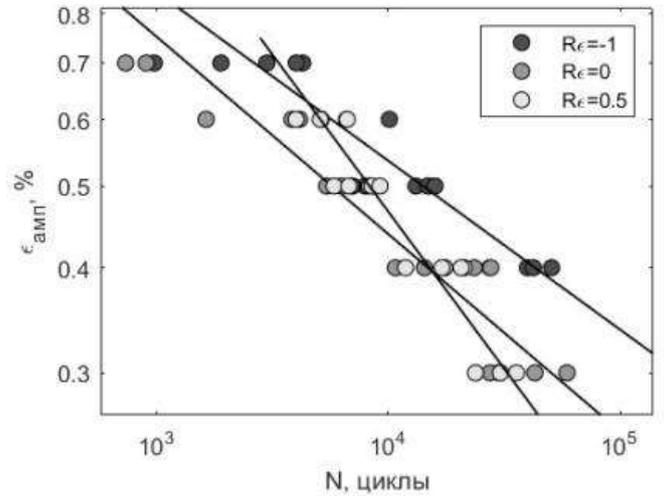
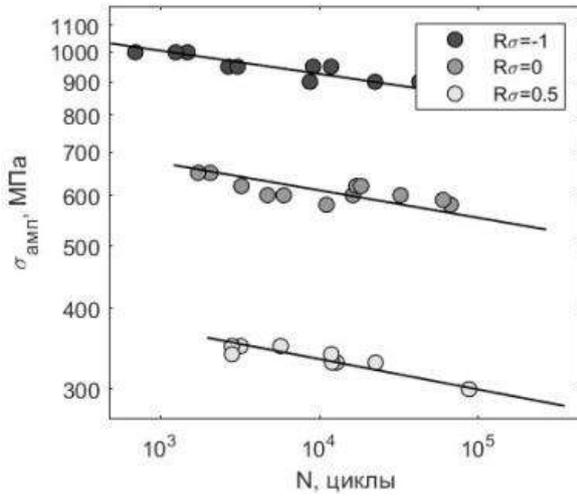
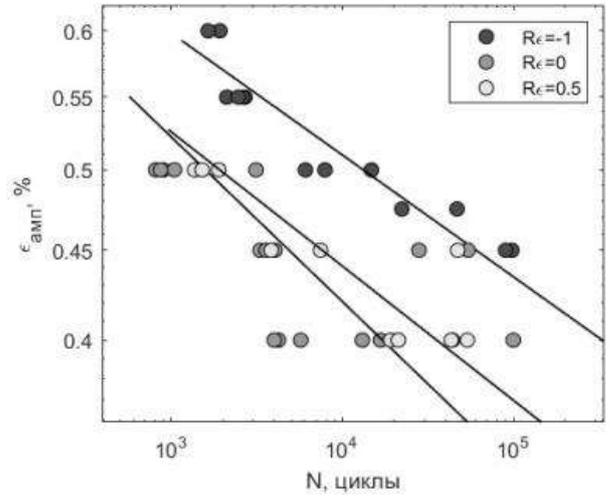
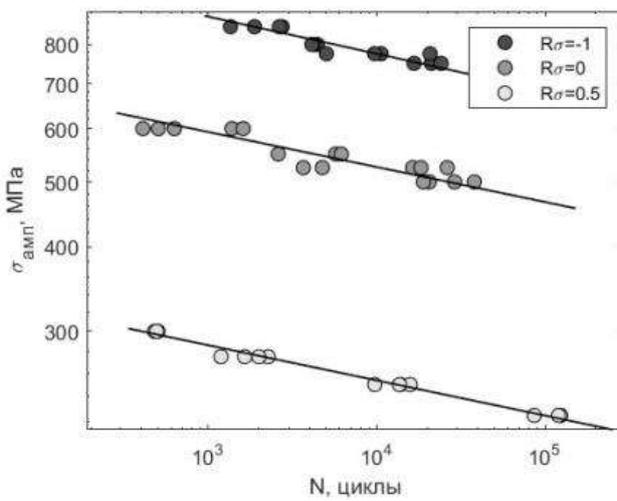
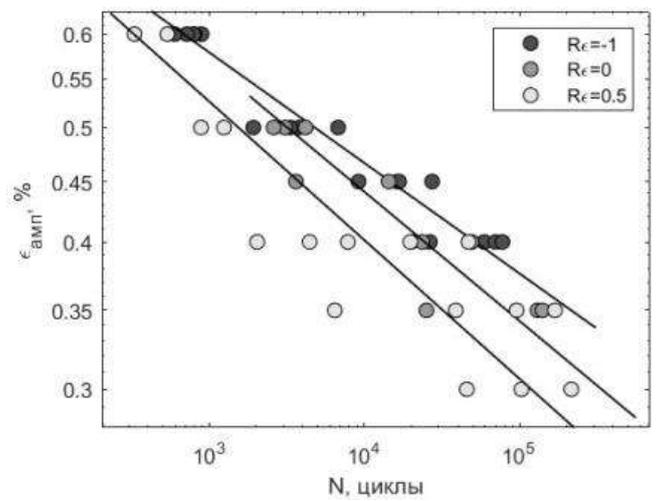
а) $T=20^{\circ}\text{C}$, «мягкий» циклб) $T=20^{\circ}\text{C}$, «жесткий» циклв) $T=650^{\circ}\text{C}$, «мягкий» циклг) $T=650^{\circ}\text{C}$, «жесткий» циклд) $T=750^{\circ}\text{C}$, «мягкий» цикле) $T=750^{\circ}\text{C}$, «жесткий» цикл

Рисунок 4.2. Кривые усталости ВЖ175.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при девяти режимах испытаний (трех температурах: 20 °С, 650 °С, 750 °С для ВЖ175 и 20 °С, 850 °С, 1050 °С ; трех коэффициентах асимметрии: $R = 0$, $R = 0.5$, $R = -1$), были построены линии средних значений $\lg N_f$, соответствующих вероятности разрушения 50% . Также определены коэффициенты линейной регрессии a и b , средние значения предела МЦУ на базе 10^4 циклов и СКО (таблица 1 для «жесткого» цикла нагружения и таблица 2 для «мягкого» цикла нагружения).

Таблица 4.1. Параметры линии регрессии при «жестком» цикле нагружения

Температура, °С	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta\epsilon$, % (на базе $N=10^4$ циклов)	СКО (4.3)
		a	b		
20	-1	5,70	-3,38	1,00	0,263
	0	5,80	-3,96	0,90	0,185
	0,5	5,34	-2,8	0,94	0,107
650	-1	8,4	-9,42	0,96	0,509
	0	7,51	-8,02	0,88	0,523
	0,5	7,91	-9,27	0,84	0,388
750	-1	7,14	-7,32	0,86	0,385
	0	7,70	-8,85	0,84	0,439
	0,5	7,10	-7,99	0,78	0,551

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных испытаний при «жестком» цикле нагружения было установлено следующее:

– для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов – на 3-5 % при повышении температуры испытания от 20°С до 650°С и на 4-10 % при повышении температуры испытания от 650 до 750 °С

- для всех трех температур при сравнении размахов деформации $\Delta\epsilon$ наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R = -1$. Наименьшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной температуры испытаний характеризуется коэффициент асимметрии $R = 0$, а для повышенных температур – коэффициент асимметрии $R = 0.5$.

– пределы выносливости на базе 10^4 циклов для комнатной и повышенных температур отличаются не более чем на 15%, однако коэффициент наклона линии регрессии b при увеличении температуры возрастает в 2-3 раза. Это говорит о том, что при рассмотрении больших баз разница пределов выносливости имеет тенденцию к увеличению. Приведенные графические представления зависимостей подтверждают эту тенденцию.

– СКО, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, значительно увеличивается при повышенных температурах по сравнению с комнатной. Зависимость СКО от коэффициента асимметрии не прослеживается.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных испытаний при «мягком» цикле нагружения было установлено следующее [2]:

- для всех трех исследуемых коэффициентов асимметрии повышение температуры вызывает снижение предела выносливости на базе 10^4 циклов на $\sim 30\%$ при повышении температуры испытания от 20 до 650°C и на 4-10 % при повышении температуры испытания от 650 до 750°C ;

- для всех трех температур при сравнении амплитуд деформации σ_a наибольшим пределом выносливости на базе 10^4 циклов характеризуется коэффициент асимметрии $R=-1$. При переходе к коэффициенту асимметрии $R=0$ предел выносливости снижается на $\sim 30\%$, а при переходе к $R=0,5$ – на $\sim 60\%$;

- при всех трех исследуемых температурах коэффициент асимметрии $R=0.5$ характеризуется значительно большим наклоном линии регрессии, чем другие коэффициенты асимметрии;

- СКО, характеризующее рассеяние экспериментальных значений, при температуре 650°C вдвое выше, чем при температуре 750°C .

Результаты исследования влияния температуры испытания на пределы выносливости:

- при «жестком» цикле нагружения влияние коэффициента асимметрии и температуры на предел выносливости незначительно;

- при «мягком» цикле нагружения предел выносливости понижается с повышением коэффициента асимметрии и повышением температуры.

Заключения по сплаву ВКНА-1ВР:

- при «жестком» цикле сплав более чувствителен к изменению коэффициента асимметрии, чем ВЖ175;

- при «мягком» цикле нагружения предел выносливости понижается с повышением коэффициента асимметрии и повышением температуры.

Таблица 4.2. Параметры линии регрессии при «мягком» цикле нагружения

Температура, °C	Коэффициент асимметрии R	Коэффициенты линейной регрессии		Предел выносливости $\Delta\sigma$, МПа (на базе $N=10^4$ циклов)	СКО (5)
		a	b		
20	-1	14,82	-0,011	1 970	0,827
	0	7,50	-0,005	1 320	0,104
	0,5	12,86	-0,024	728	1,040
650	-1	14,65	-0,012	1 580	0,465
	0	12,10	-0,013	1 220	0,451
	0,5	11,01	-0,021	670	0,505
750	-1	11,05	-0,009	1 550	0,209
	0	11,98	-0,015	1 050	0,268
	0,5	10,80	-0,027	500	0,362

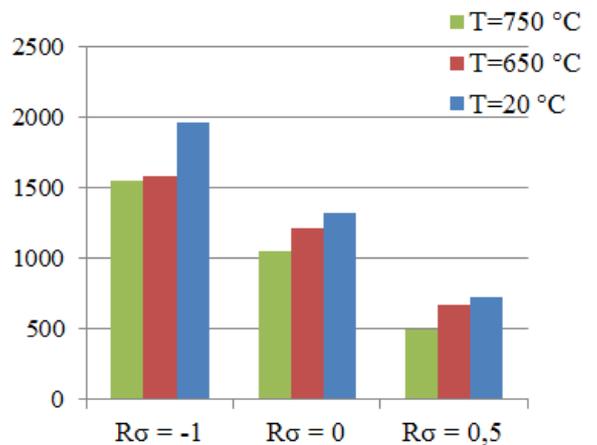
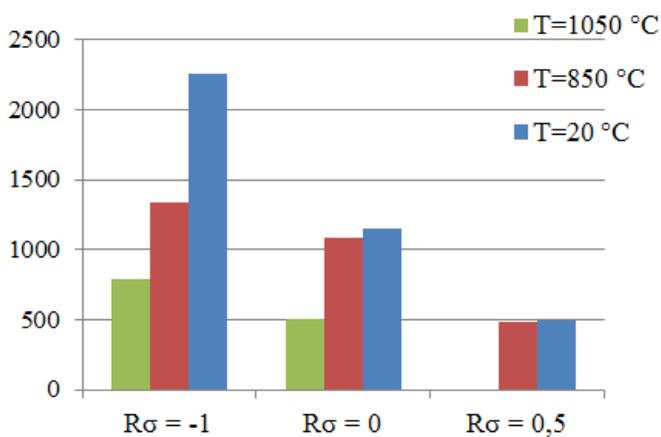
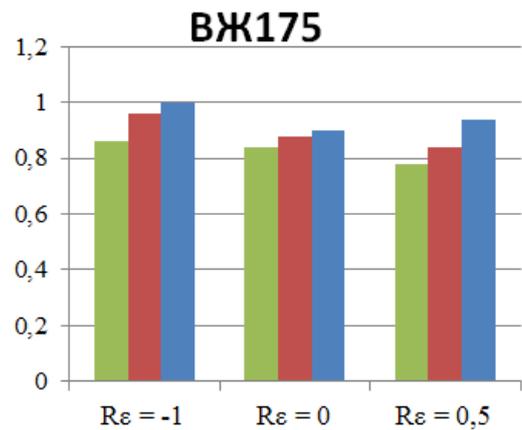
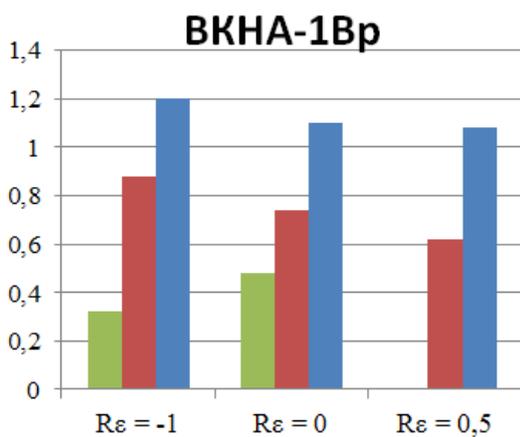


Рисунок 4.3 – Влияние температуры на пределы выносливости жаропрочных никелевых сплавов

4.2 Малоцикловая усталость при «жестком» цикле нагружения

Испытания на малоцикловую усталость были проведены с применением цифрового контроллера, позволяющего регистрировать в течении испытания деформации, считываемые с помощью экстензометра, и соответствующие им нагрузки, считываемые с помощью датчика силы. Регистрация данных проводилась каждые 0.02 с, то есть, было получено по 50 точек на цикл. Петли гистерезиса записаны в машинные файлы для первых десяти циклов, далее для каждого десятого цикла, далее для каждого сотого цикла и т.д., что соответствует требованиям РЦ АП-33.15. Кроме того, петли гистерезиса записаны для последних двухсот циклов.

Циклическое поведение материалов характеризует развитие параметров петли упруго-пластического гистерезиса, поэтому по зарегистрированным петлям гистерезиса были определены амплитудные и средние напряжения, а также размах пластической деформации в цикле. Размах пластической деформации определен как ширина петли упруго-пластического гистерезиса. Для этого с применением линейной интерполяции были найдены точки пересечения петли гистерезиса с линией среднего напряжения цикла (рисунок 4.4). Разность значений деформации в этих точках является размахом пластической деформации в цикле.

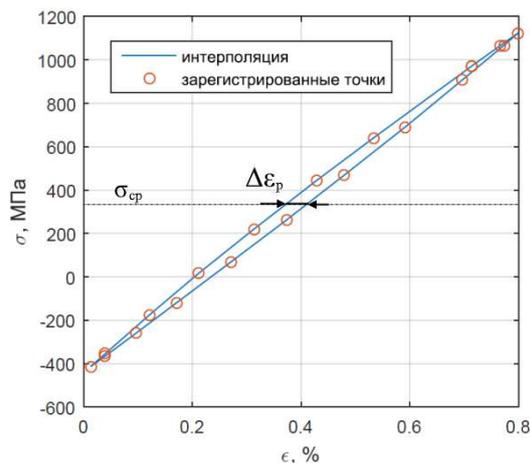
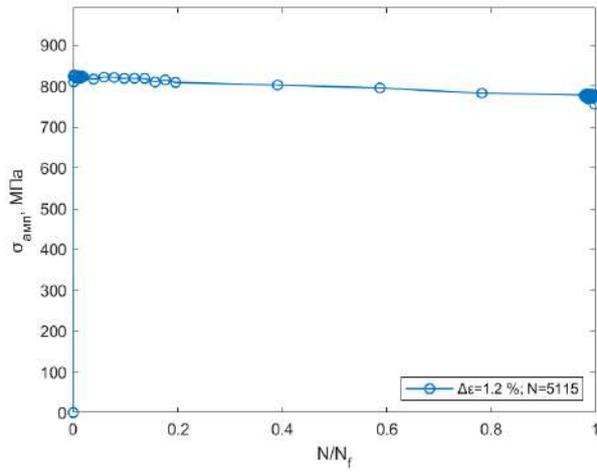


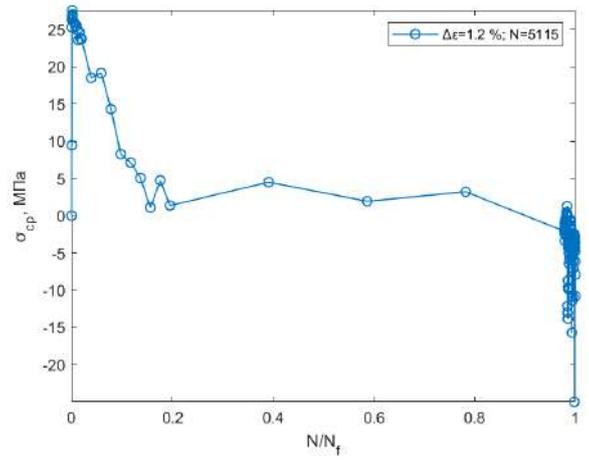
Рисунок 4.4– Определение размаха пластической деформации

Зависимости средних и амплитудных значений напряжений цикла от относительного количества циклов - текущего числа циклов, отнесенного к числу циклов до разрушения - представлены на рисунках 4.5, 4.7, 4.9 для ВЖ175 и на рисунках 4.11, 4.13, 4.15 для ВКНА-1ВР. Зависимости приведены для нескольких уровней нагружения.

Зависимость пластической деформации от относительного числа циклов и петли упруго-пластического гистерезиса представлены на рисунках 4.6, 4.8, 4.10 для ВЖ175 и на рисунках 4.12, 4.14, 4.16 для ВКНА-1ВР. Развитие пластической деформации в цикле приведено для нескольких уровней нагружения, петли упруго-пластического гистерезиса - для одного уровня нагружения на 15-ом цикле, в середине испытания и на последнем цикле нагружения.

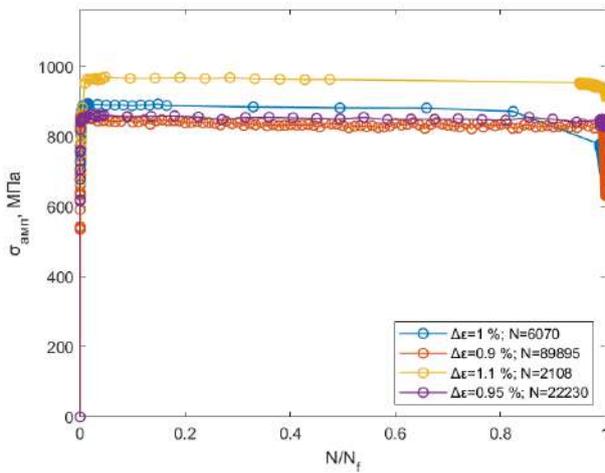


а)

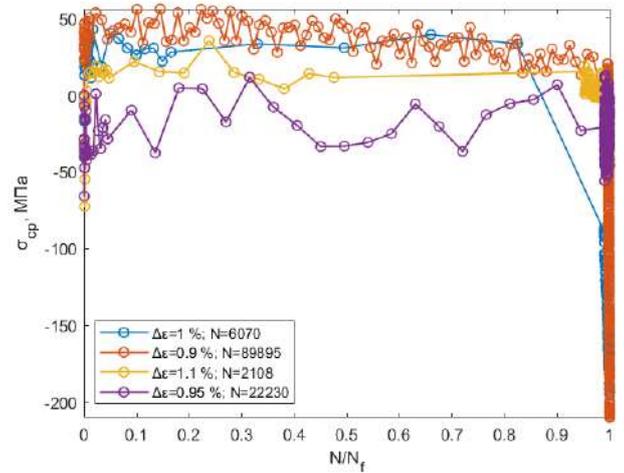


б)

20 °C

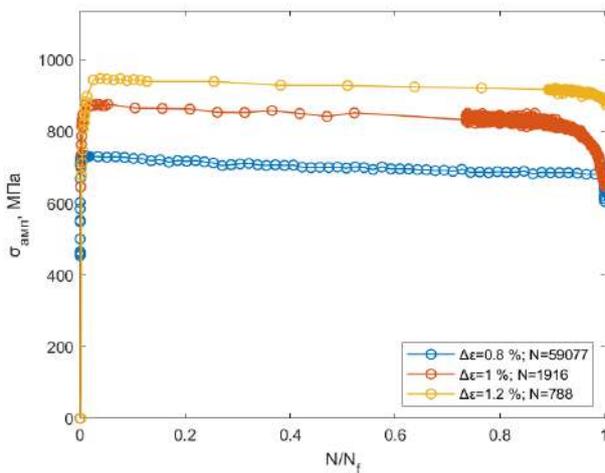


в)

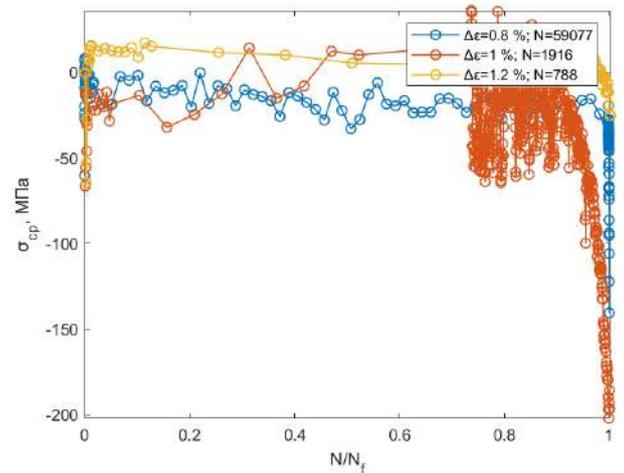


г)

650 °C



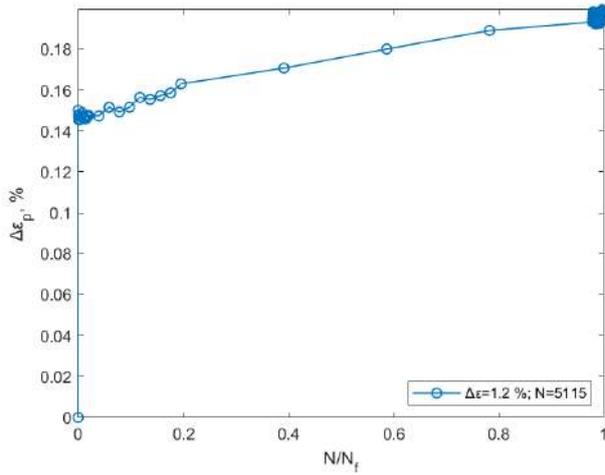
д)



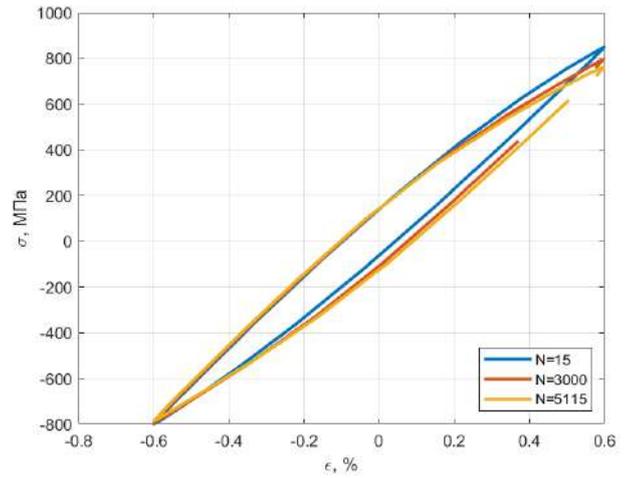
е)

750 °C

Рисунок 4.5 – Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВЖ175 при $R_\epsilon = -1$ при температурах 20, 650 и 750 °C

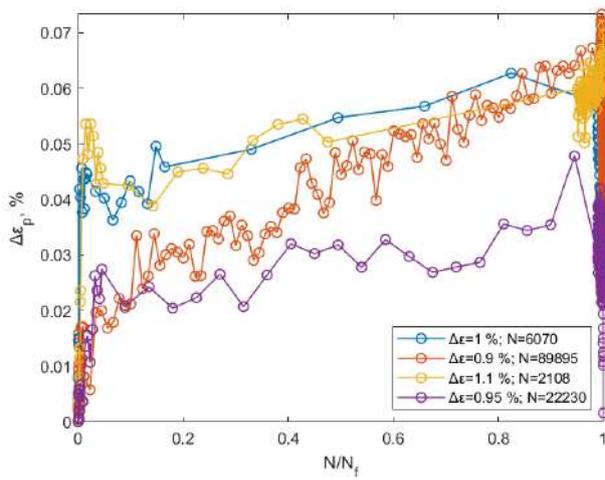


а)

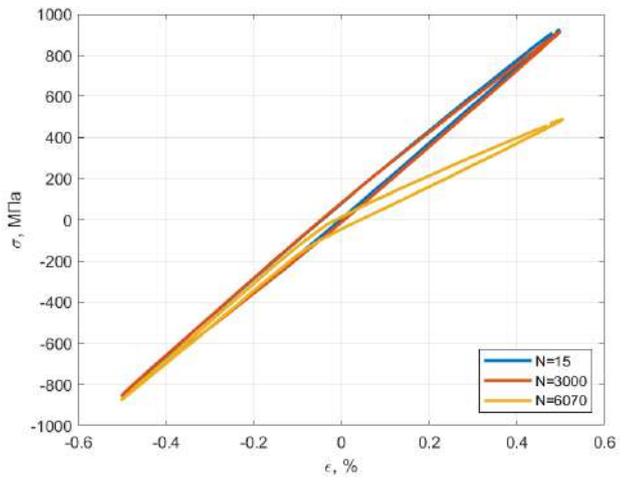


20 °С

б)

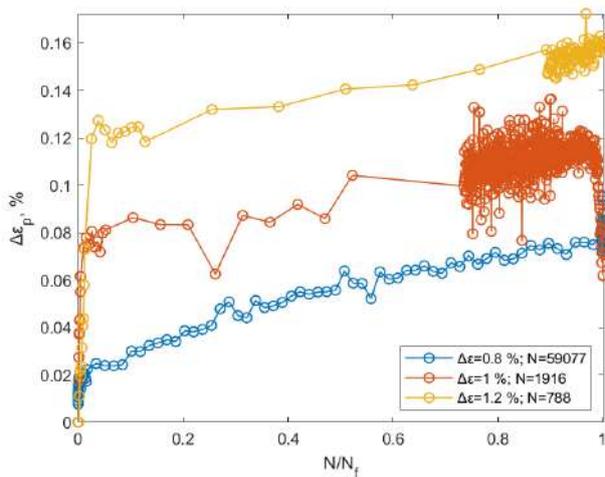


в)

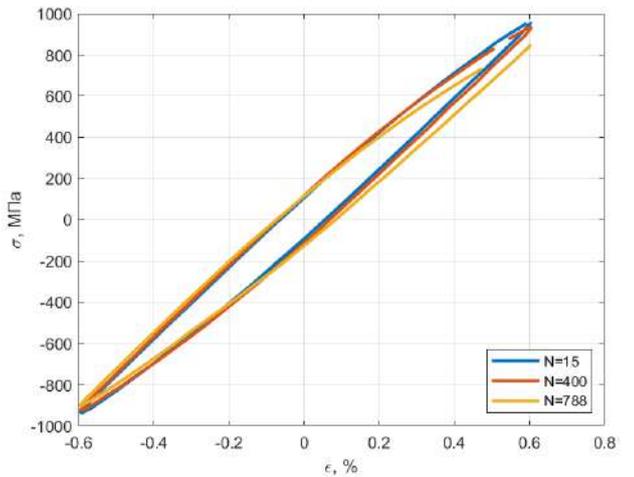


650 °С

г)



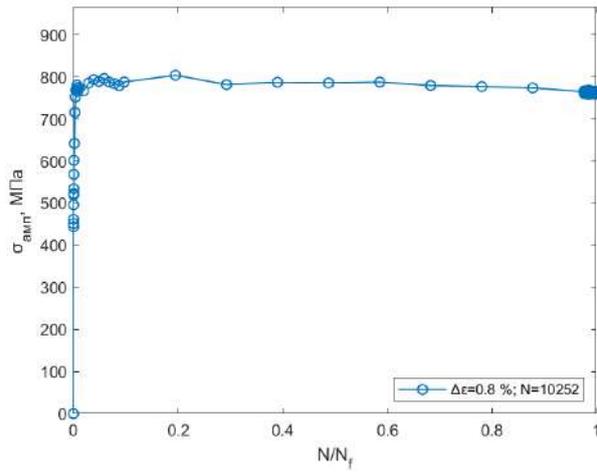
д)



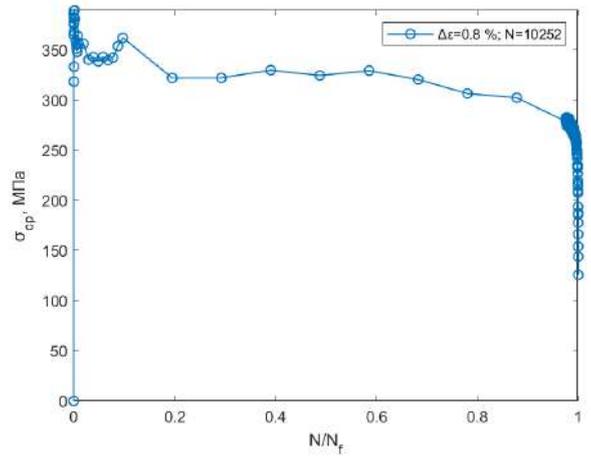
750 °С

е)

Рисунок 4.6 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов сплава ВЖ175 при $R_\epsilon = -1$ при температурах 20, 650 и 750 °С

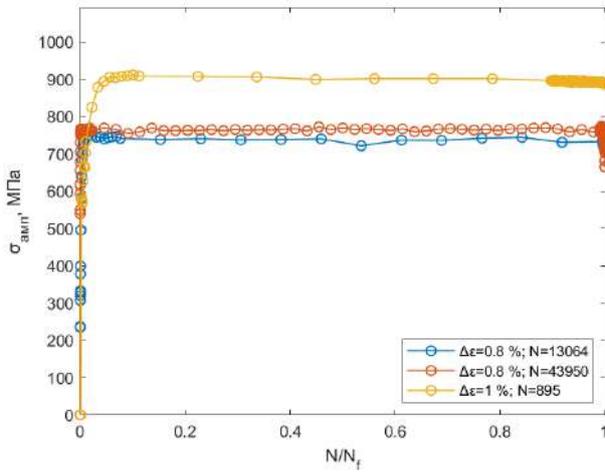


а)

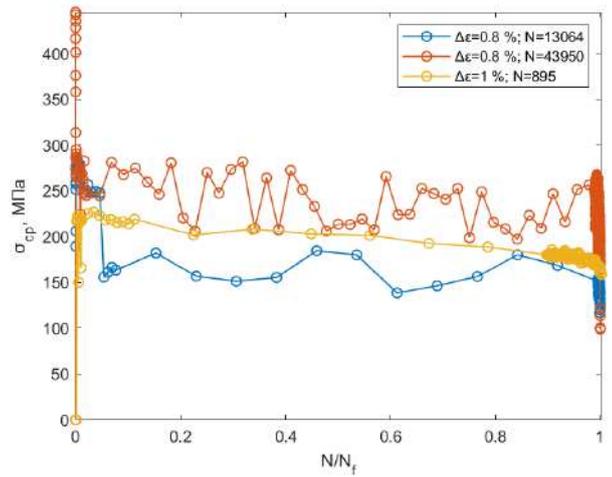


б)

20 °C

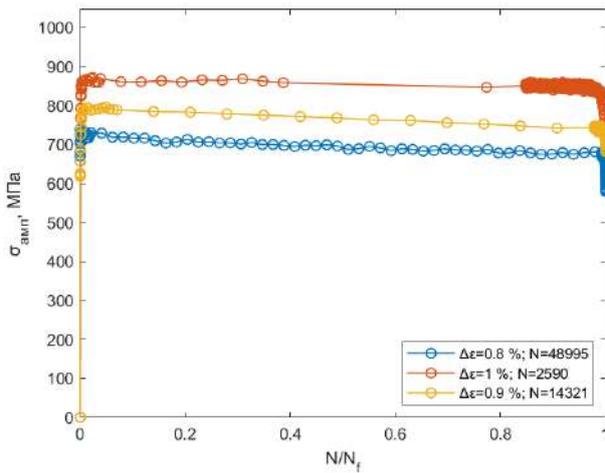


в)

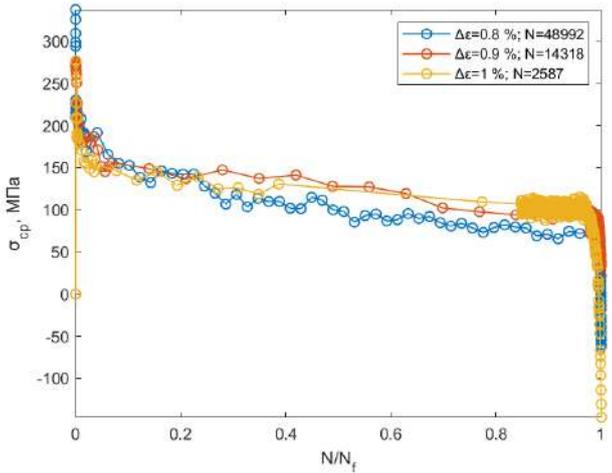


г)

650 °C



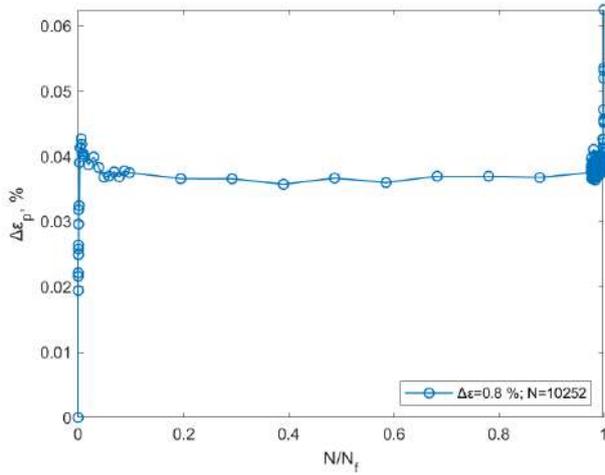
д)



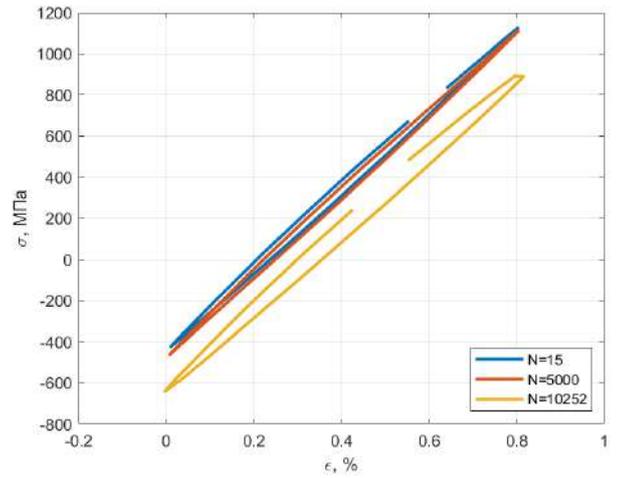
е)

750 °C

Рисунок 4.7 – Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВЖ175 при $R_\epsilon = 0$ при температурах 20, 650 и 750 °C

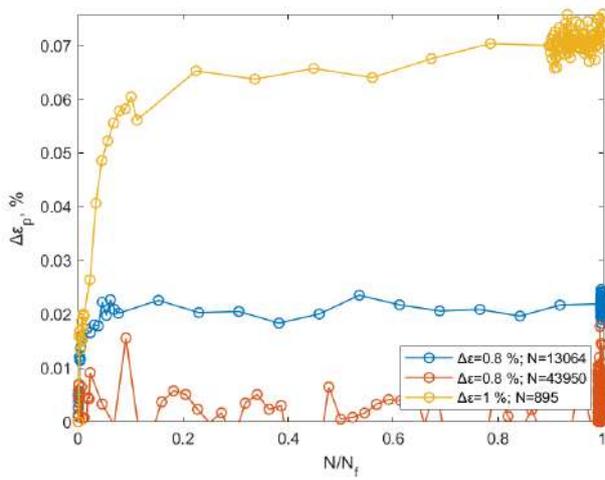


а)

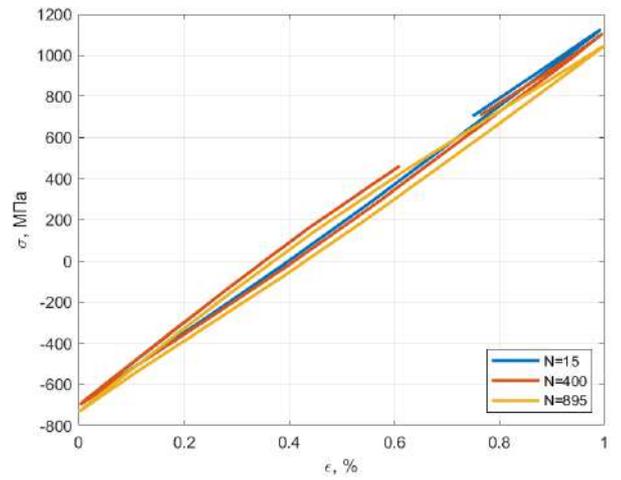


б)

20 °C

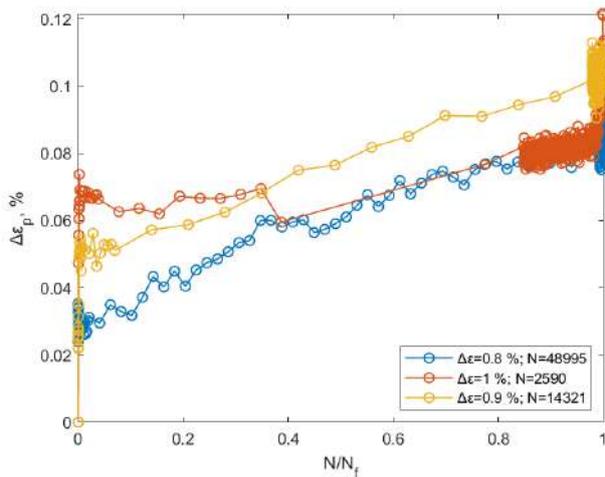


в)

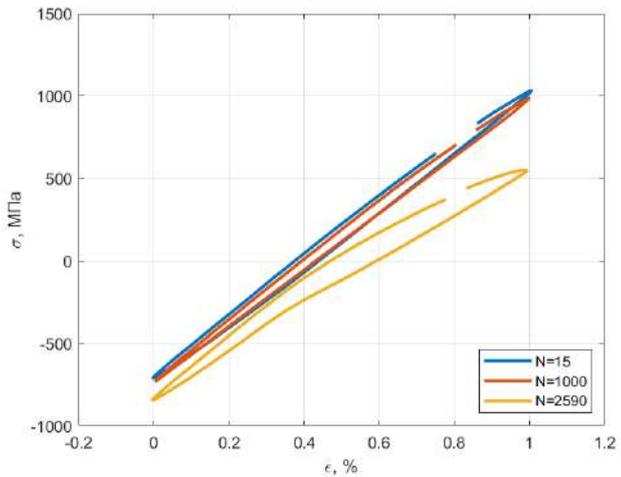


г)

650 °C



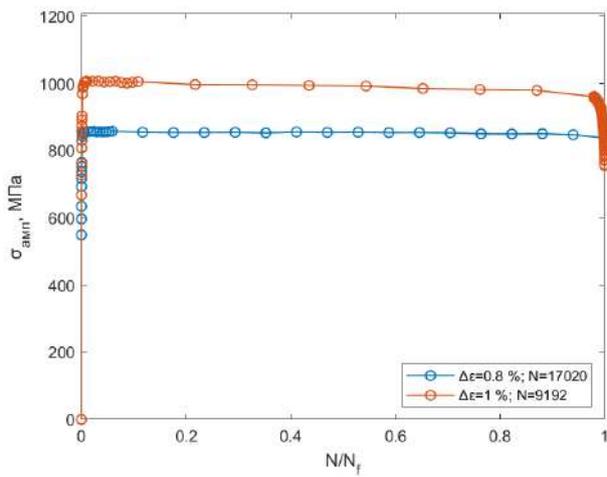
д)



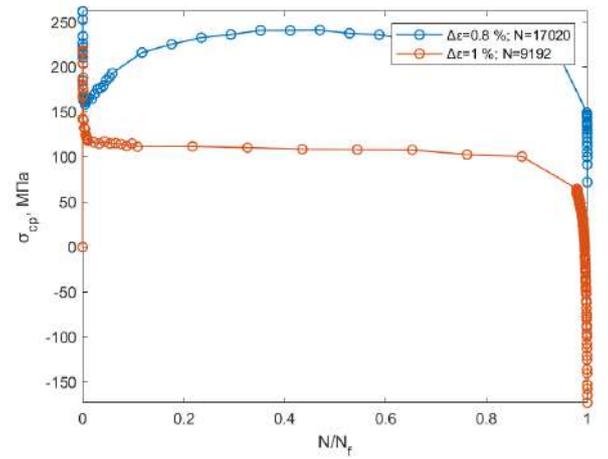
е)

750 °C

Рисунок 4.8 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов сплава ВЖ175 при $R_\epsilon = 0$ при температурах 20, 650 и 750 °C

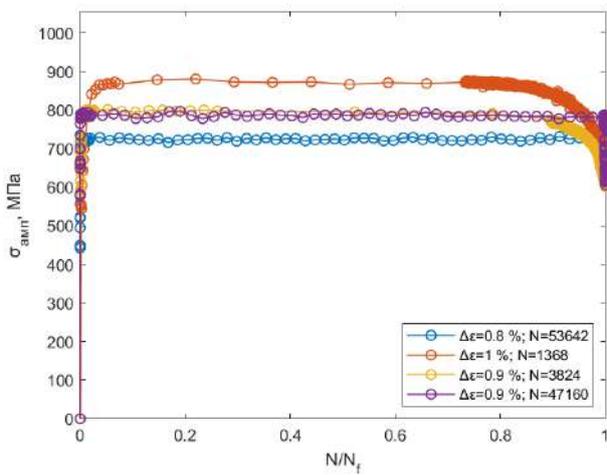


а)

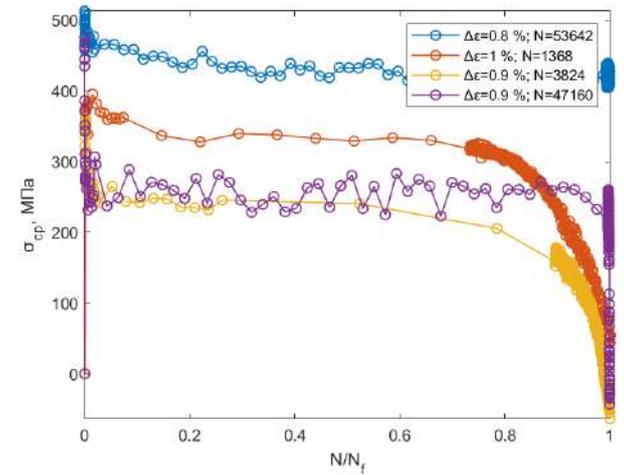


20 °C

б)

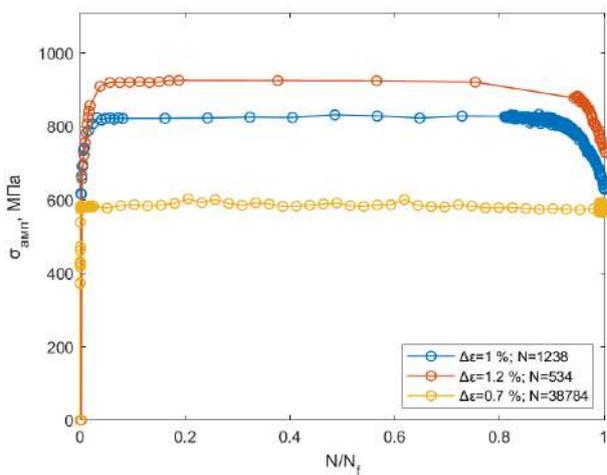


в)

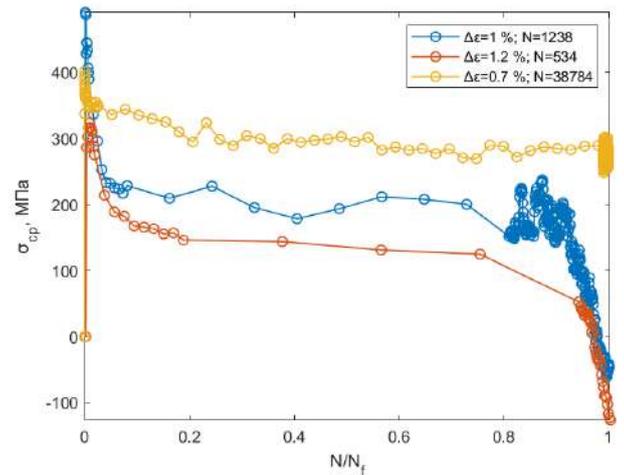


650 °C

г)



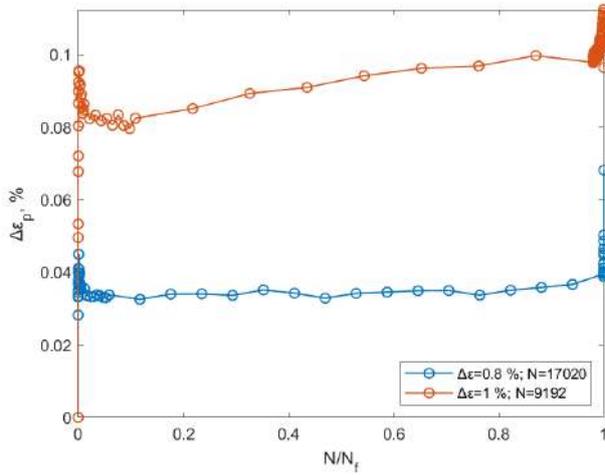
д)



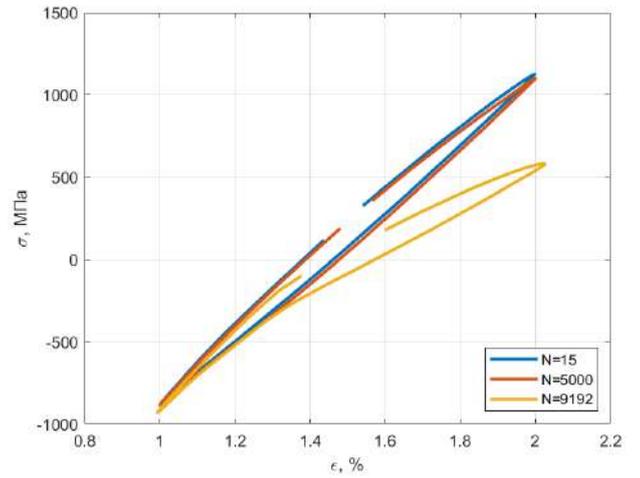
750 °C

е)

Рисунок 4.9 – Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВЖ175 при $R_\epsilon = 0,5$ при температурах 20, 650 и 750 °C

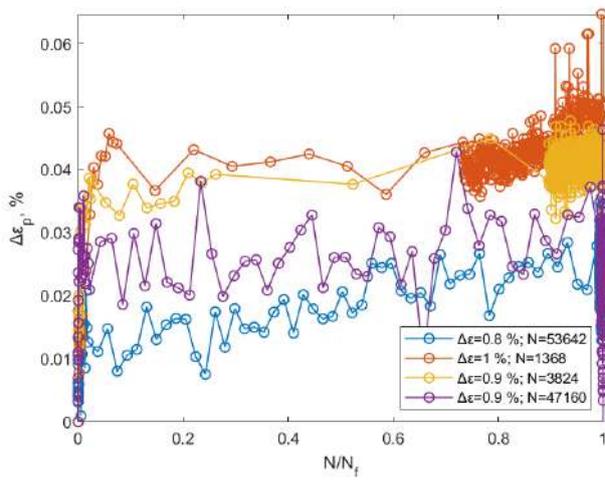


а)

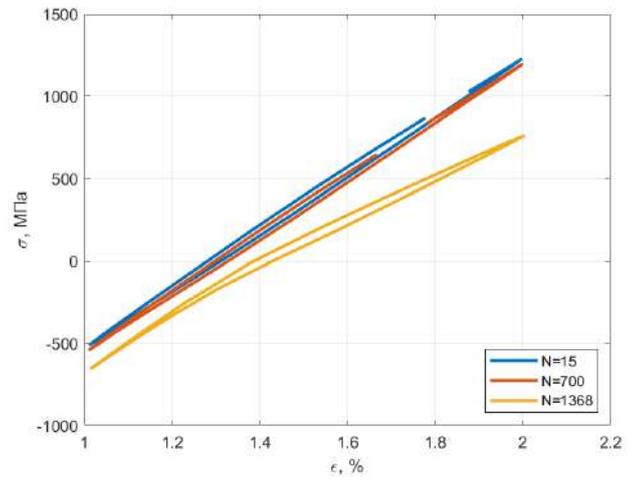


б)

20 °С

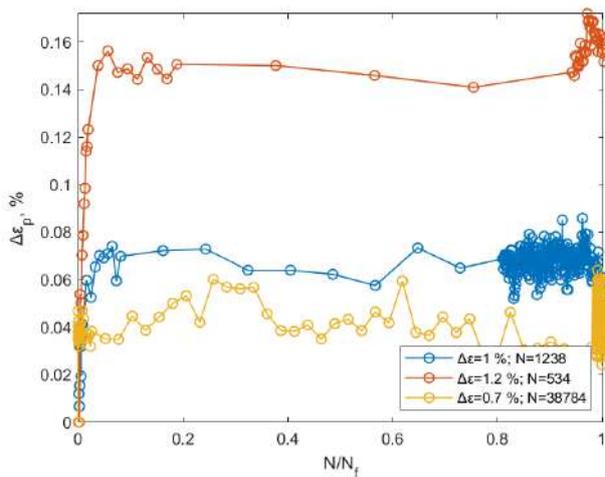


в)

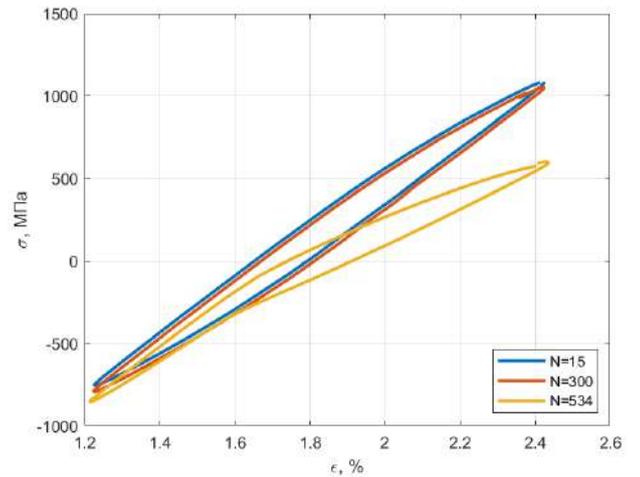


г)

650 °С



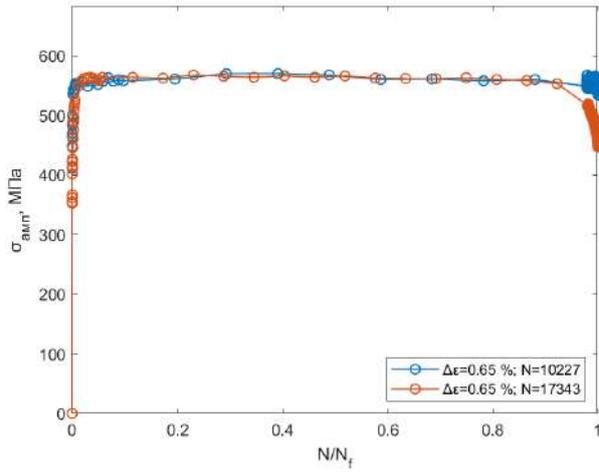
д)



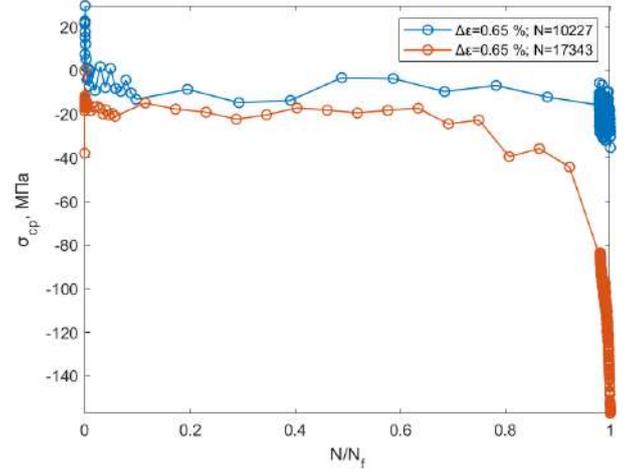
е)

750 °С

Рисунок 4.10 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов сплава ВЖ175 при $R_\epsilon = 0,5$ при температурах 20, 650 и 750 °С

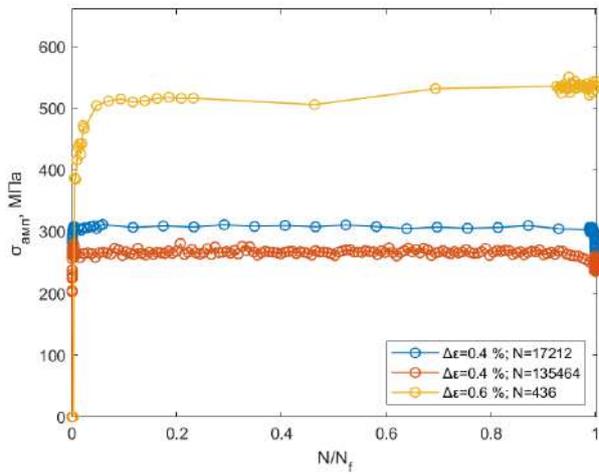


а)

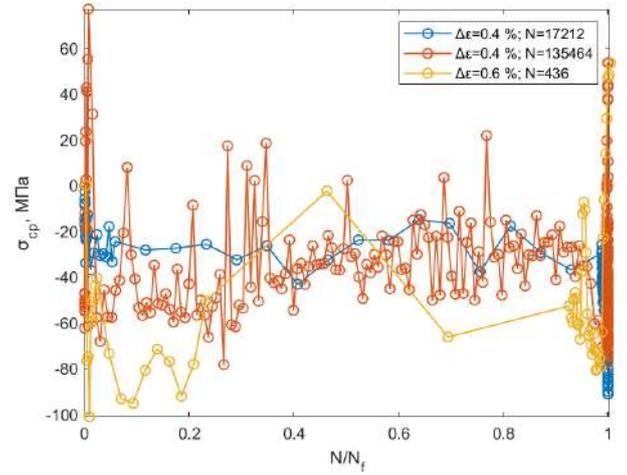


б)

20 °C

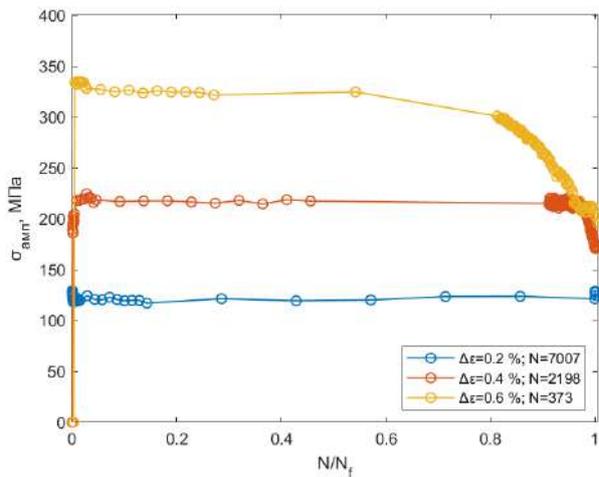


в)

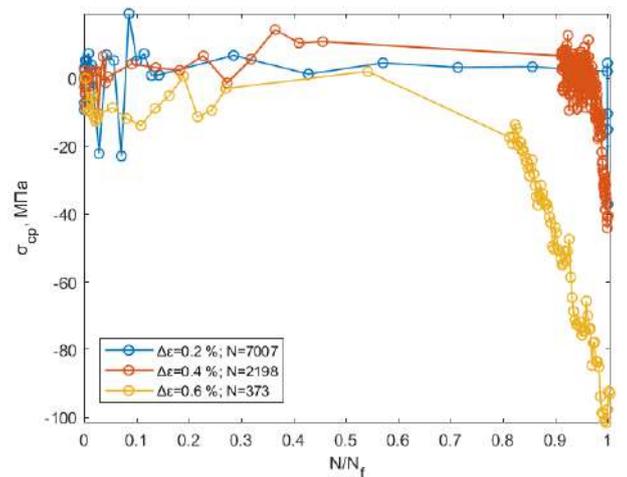


г)

850 °C



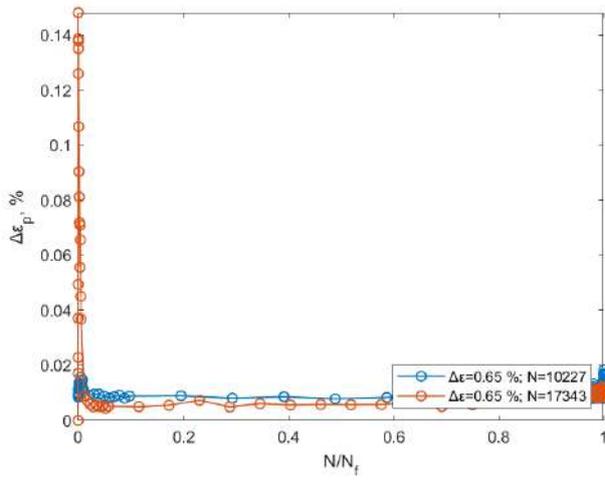
д)



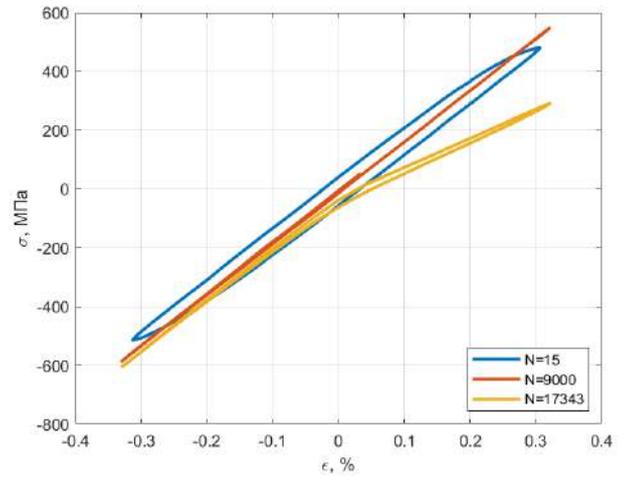
е)

1050 °C

Рисунок 4.11– Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВКНА-1ВР при $R_\epsilon = -1$ при температурах 20, 850 и 1050 °C

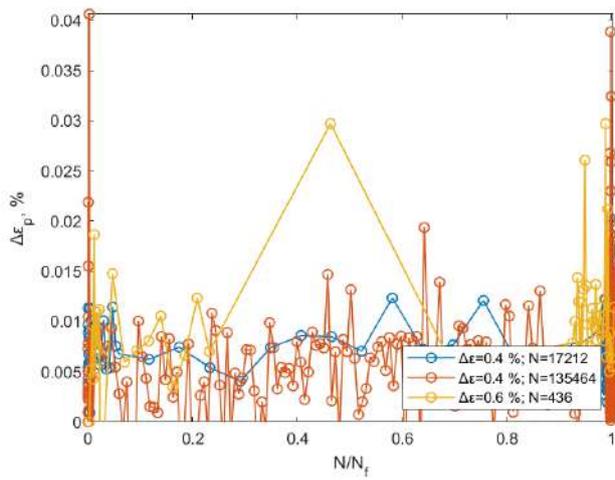


а)

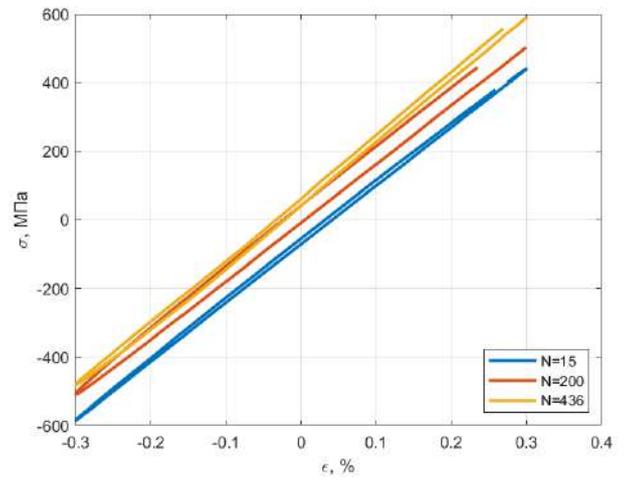


б)

20 °С

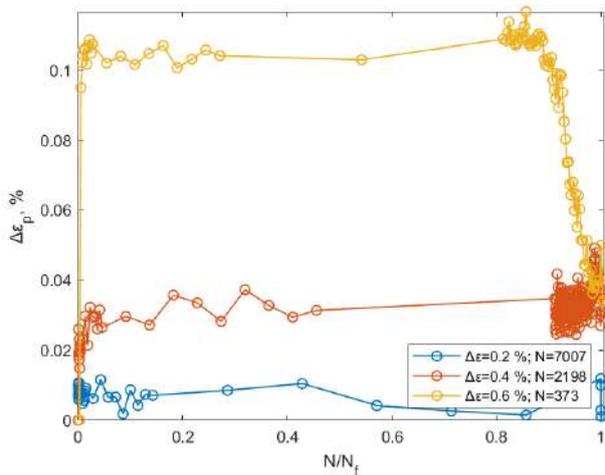


в)

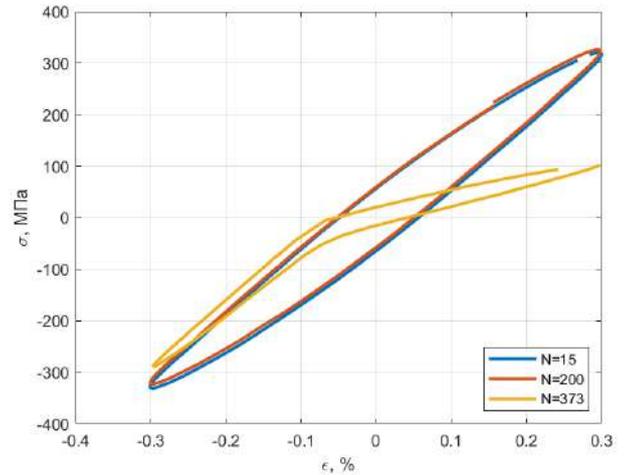


г)

850 °С



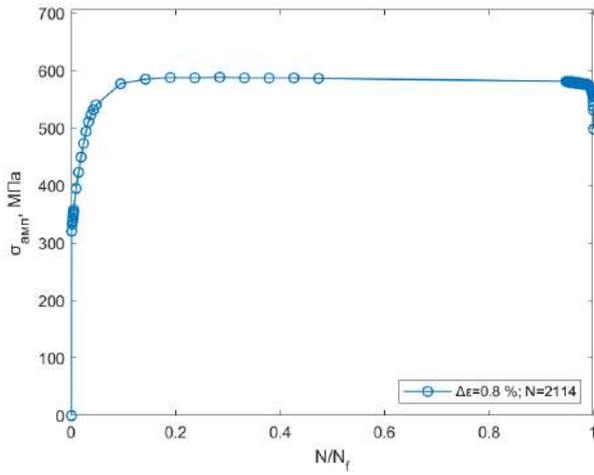
д)



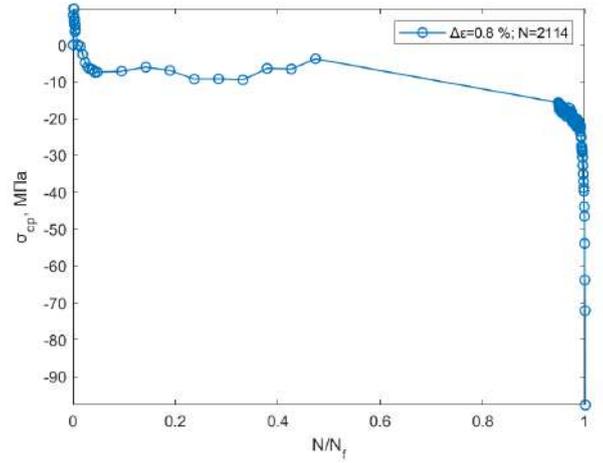
е)

1050 °С

Рисунок 4.12 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г) образцов сплава ВКНА-1ВР при $R_\epsilon = -1$ при температурах 20, 850 и 1050 °С

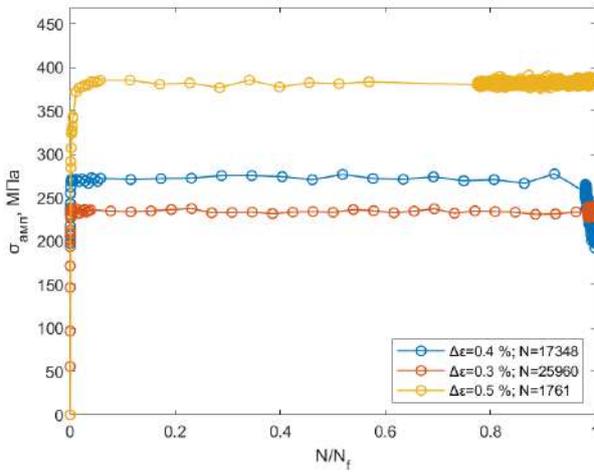


а)

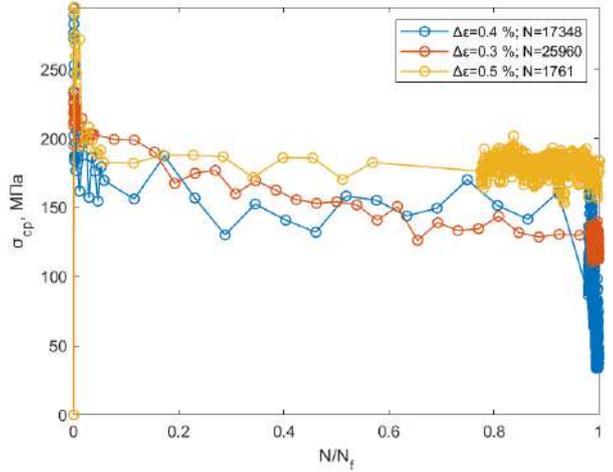


б)

20 °C

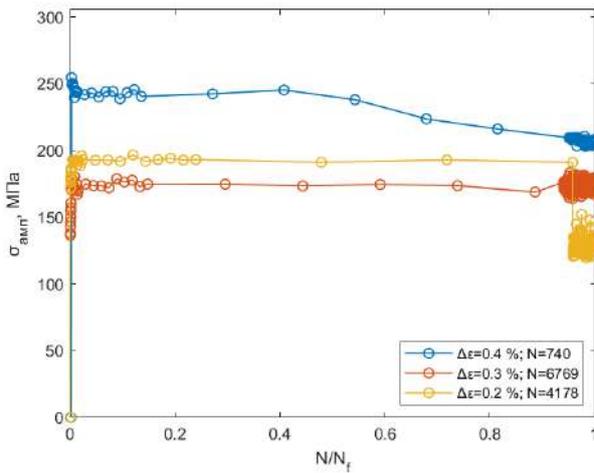


в)

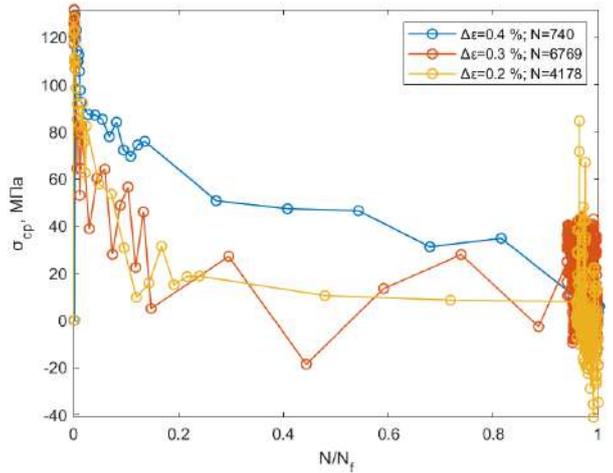


г)

850 °C



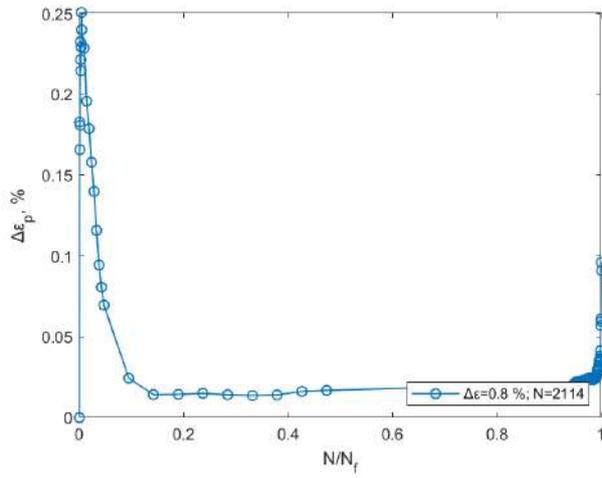
д)



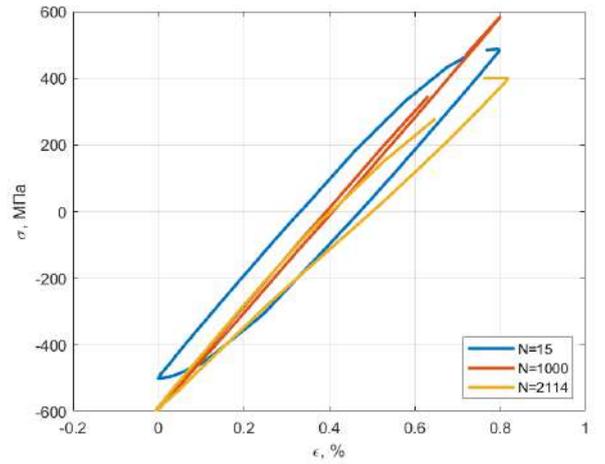
е)

1050 °C

Рисунок 4.13 – Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВКНА-1ВР при $R_\varepsilon = 0$ при температурах 20, 850 и 1050 °C

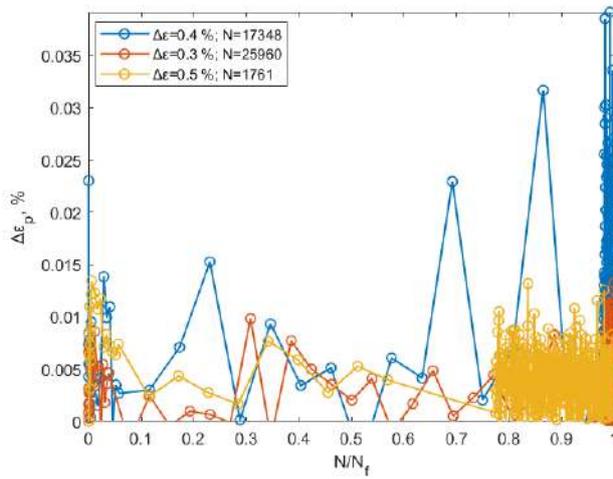


а)

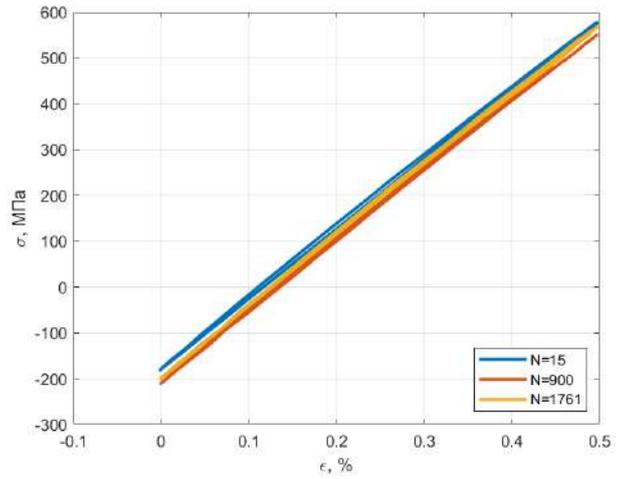


20 °C

б)

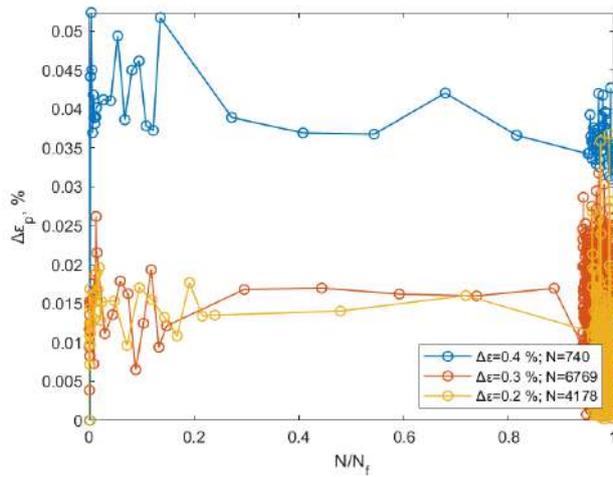


в)

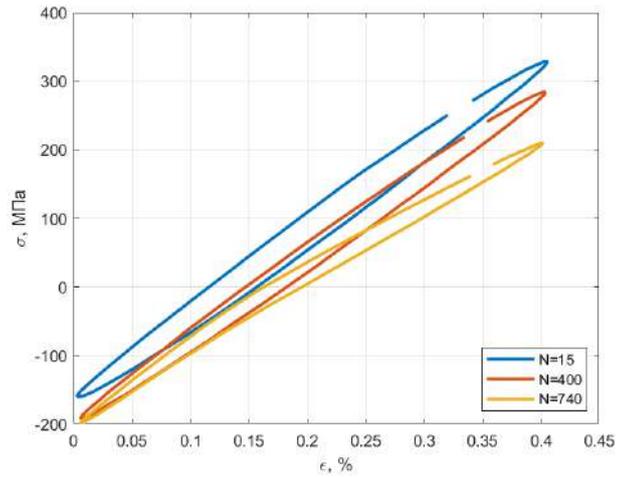


850 °C

г)



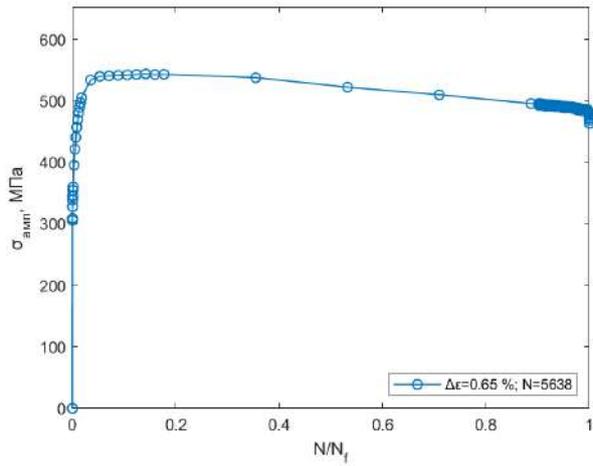
д)



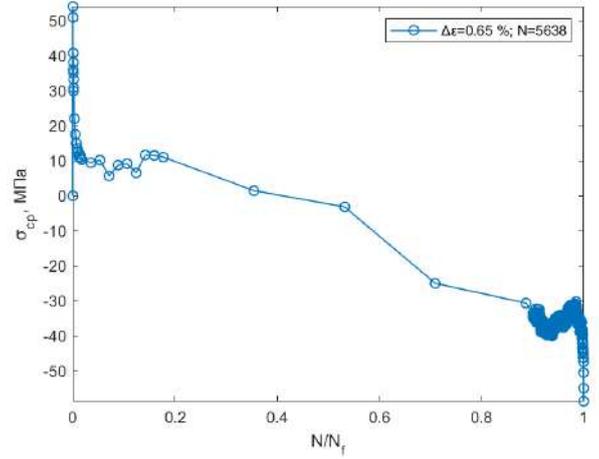
1050 °C

е)

Рисунок 4.14 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов сплава ВКНА-1ВР при $R_\epsilon = 0$ при температурах 20, 850 и 1050 °C

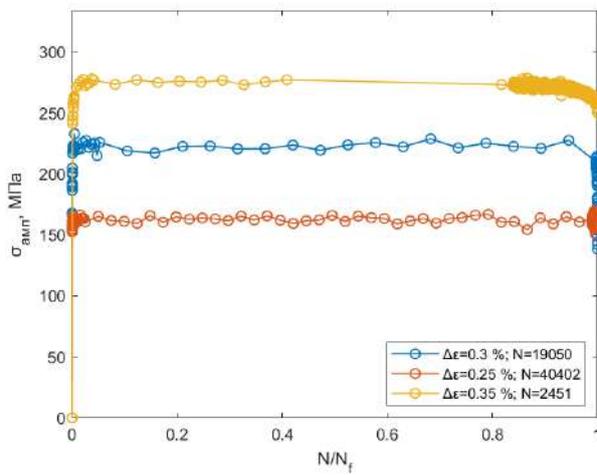


а)

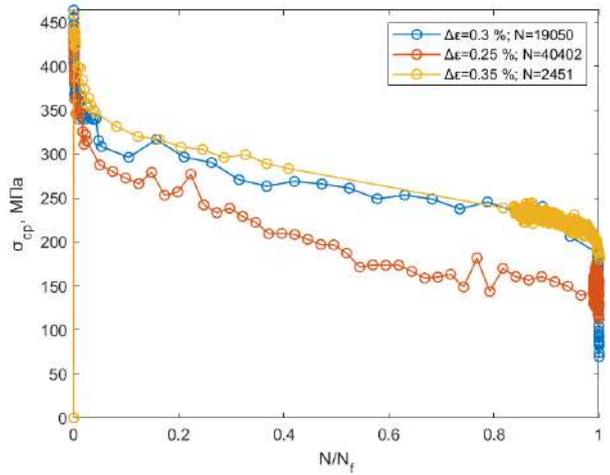


б)

20 °C

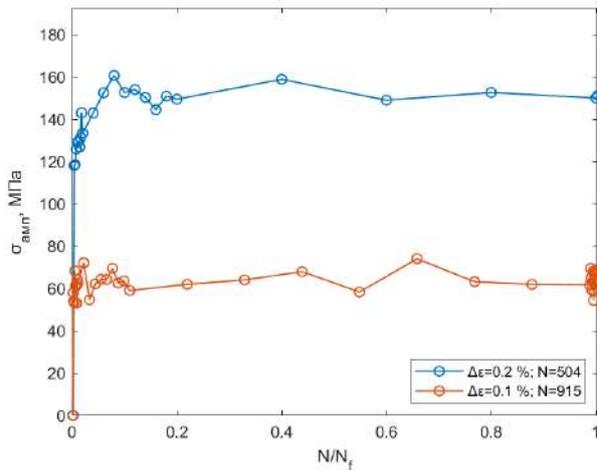


в)

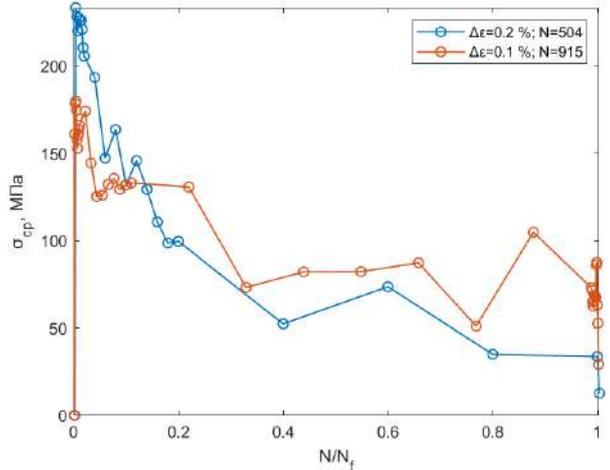


г)

850 °C



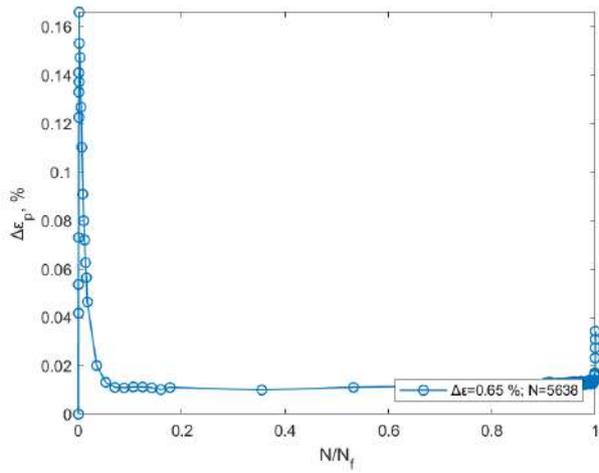
д)



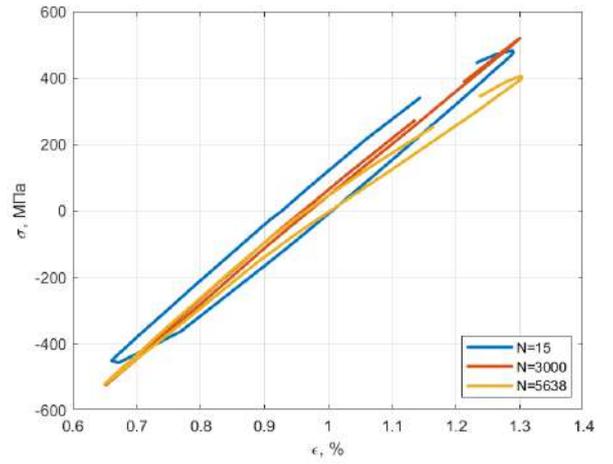
е)

1050 °C

Рисунок 4.15 – Развитие амплитудного (а, в, д) и среднего (б, г, е) напряжений в цикле образцов ВКНА-1ВР при $R_\epsilon = 0,5$ при температурах 20, 850 и 1050 °C

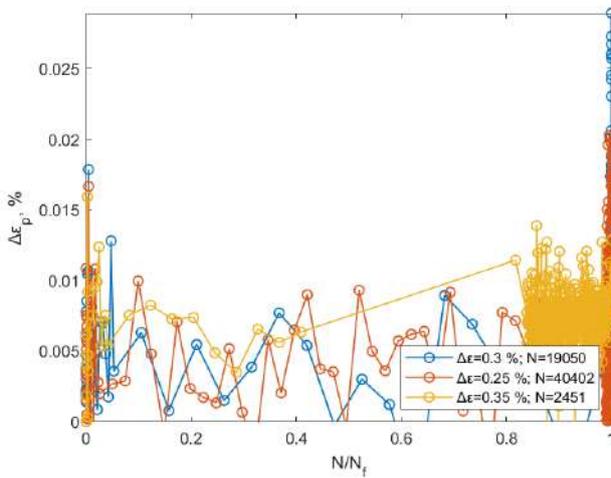


а)

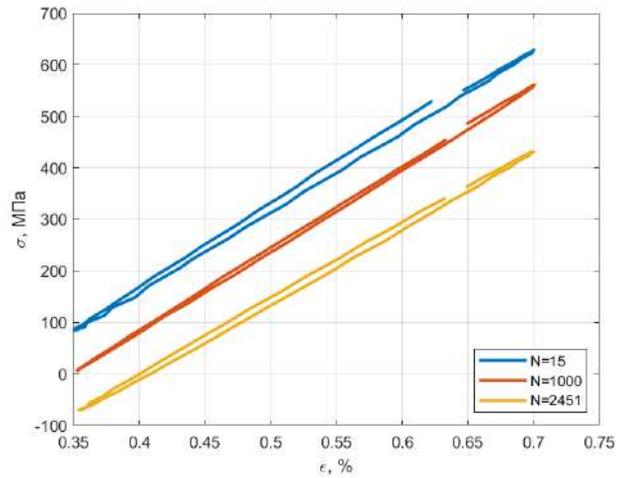


б)

20 °C

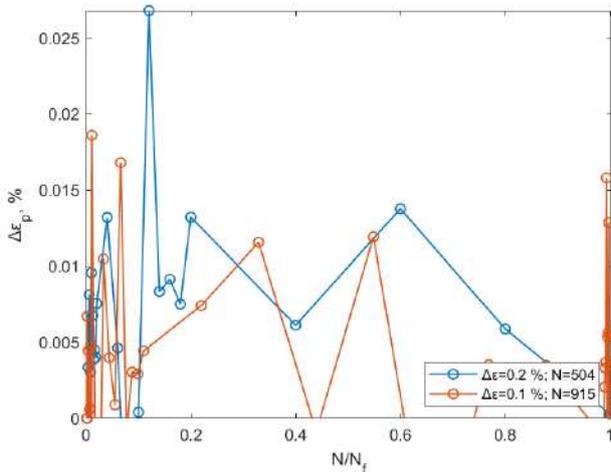


в)

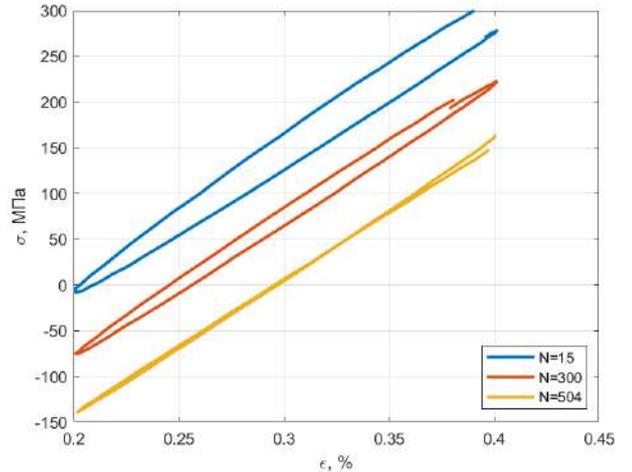


г)

850 °C



д)



е)

1050 °C

Рисунок 4.16 – Развитие пластической деформации в цикле (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов сплава ВКНА-1ВР при $R_\varepsilon = 0,5$ при температурах 20, 850 и 1050 °C

Как показано на рисунках, ВКНА-1ВР и ВЖ175 циклически стабильны на всем диапазоне нагрузок, температур и асимметрий цикла.

4.3 Малоцикловая усталость при «мягком» цикле нагружения

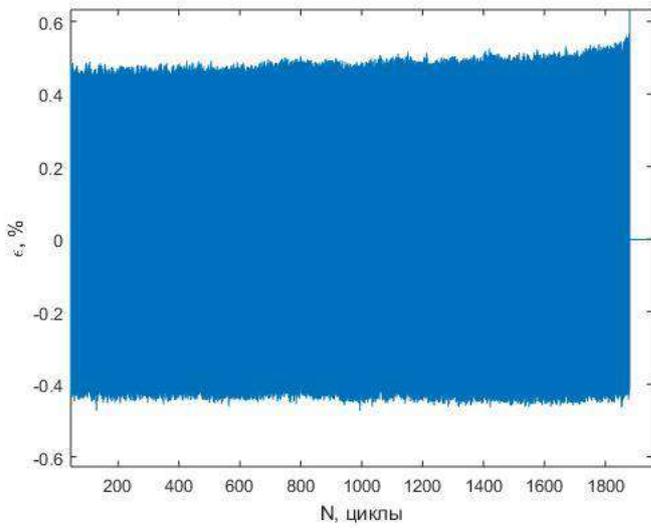
Испытания на малоцикловую усталость проведены с записью деформаций с помощью высокотемпературного экстензометра. Запись данных - нагрузок и соответствующих им деформаций - проводили на каждом цикле нагружения раз в 0,02 с. Это позволяет наблюдать качественные отличия испытаний, проведенных при «мягком» и «жестком» циклах нагружения.

На рисунках 4.17-4.21 показаны изменения деформаций и петель упруго-пластического гистерезиса сплава ВЖ175 при различных коэффициентах асимметрии, а на рисунках 4.22-4.23 – для ВКНА-1ВР.

И для ВКНА-1ВР, и для ВЖ175 при асимметричном цикле нагружения при повышенной температуре наблюдается накопление односторонних деформаций циклической ползучести или ратчетинг. Примечательно, что это накопление делится на три стадии, как и при статической ползучести: стадию переходной ползучести, стадию установившейся ползучести, стадию ускоренной ползучести. На стадии установившейся ползучести скорость накопления деформации ползучести тем больше, чем выше уровень нагружения и чем больше асимметрия цикла.

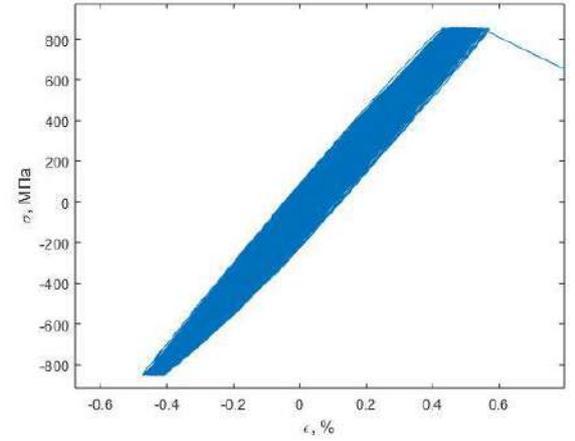
В других же случаях - при симметричном цикле нагружения или при комнатной температуре - накопление односторонних деформаций незначительно, однако наблюдаются большие деформации на нулевом полуцикле.

При несимметричном «мягком» цикле наблюдается значительное разнообразие циклического отклика исследуемых материалов. На рисунке 4.24 показаны параметры, характеризующие поведения материала при нагружении и зависящие от параметров испытаний: $\Delta\varepsilon$ – размах деформации в цикл; $d\varepsilon/dN$ – скорость накопления деформации в цикле на стадии установившейся ползучести; $N_{\text{устойчив}}$ – протяженность линейного участка накопления деформации; ε_{max} – накопленная средняя деформация перед разрушением; ε_0 – деформация на нулевом полуцикле; $\Delta\varepsilon_p$ – размах пластической деформации в цикле

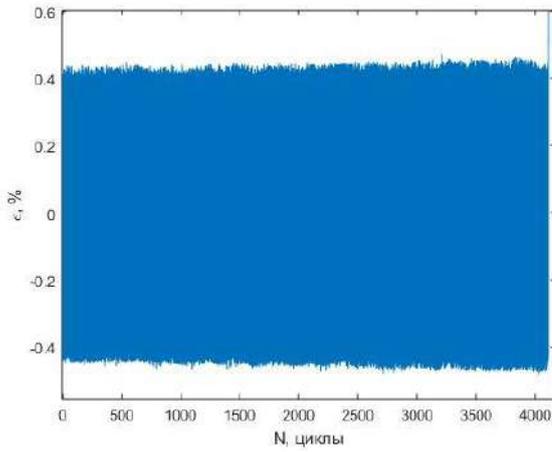


а)

$\sigma_{\max} = 850 \text{ МПа}, N=1\ 881.$

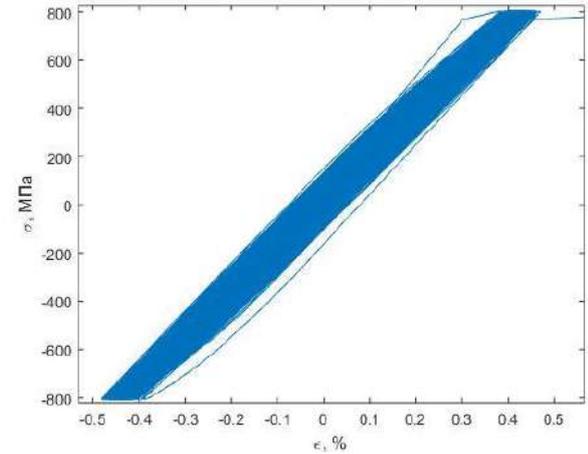


б)

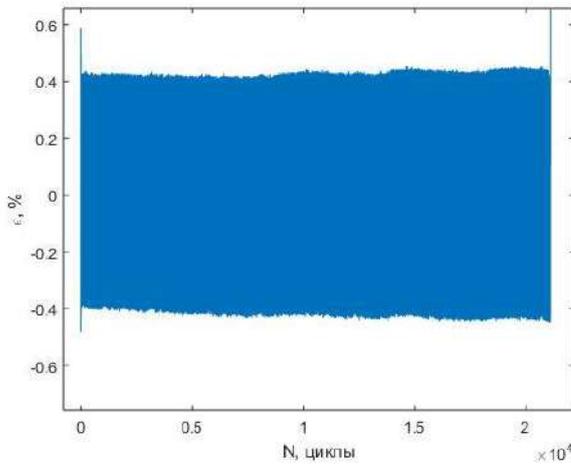


в)

$\sigma_{\max} = 800 \text{ МПа}, N=4\ 119.$

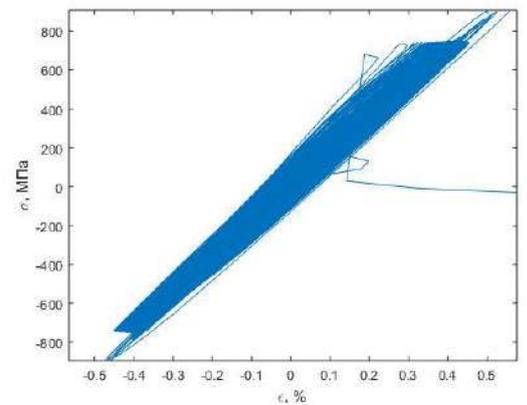


г)



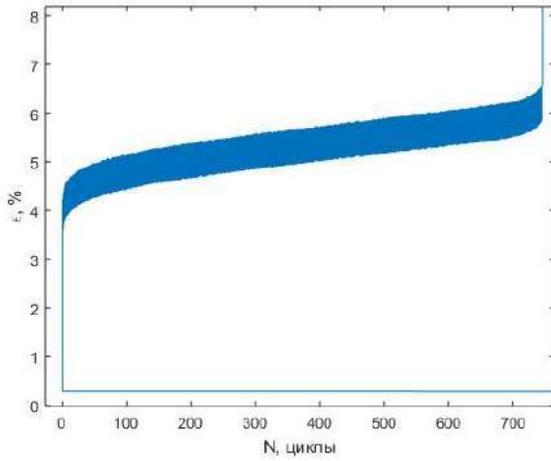
д)

$\sigma_{\max} = 750 \text{ МПа}, N= 21\ 104.$



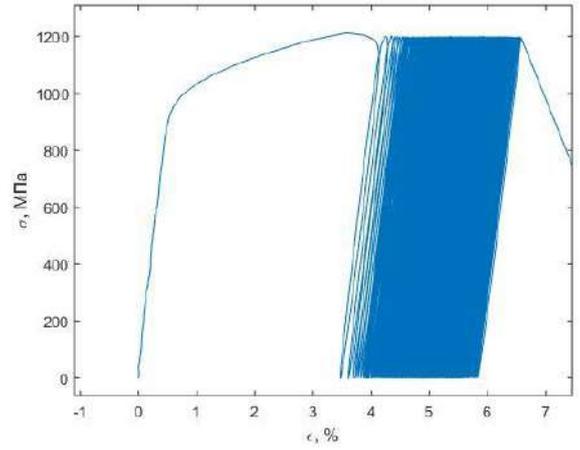
е)

Рисунок 4.17 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВЖ175 при $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_\sigma = -1$

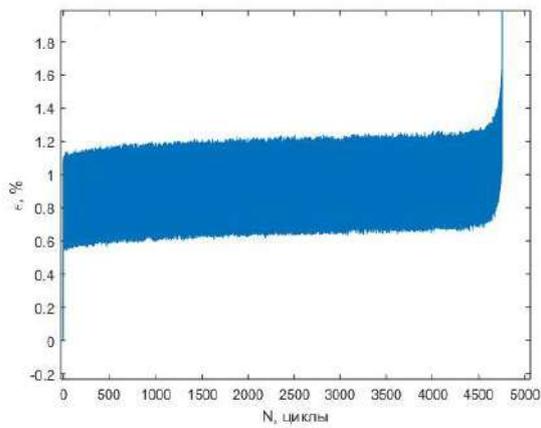


а)

$\sigma_{\max} = 1200 \text{ МПа}, N=745.$

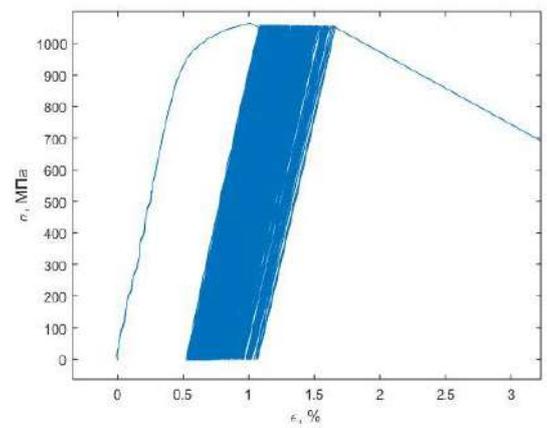


б)

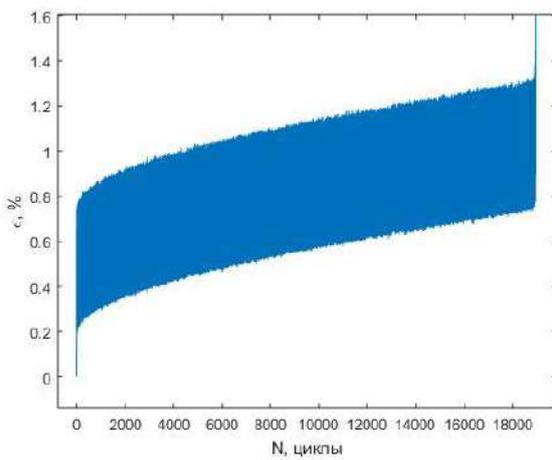


в)

$\sigma_{\max} = 1050 \text{ МПа}, N=4759.$

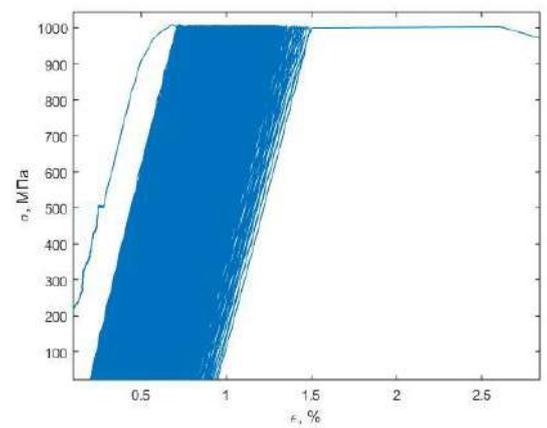


г)



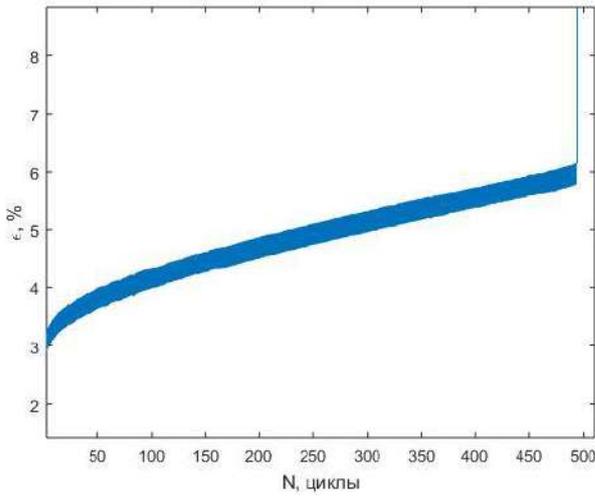
д)

$\sigma_{\max} = 1000 \text{ МПа}, N=18944.$



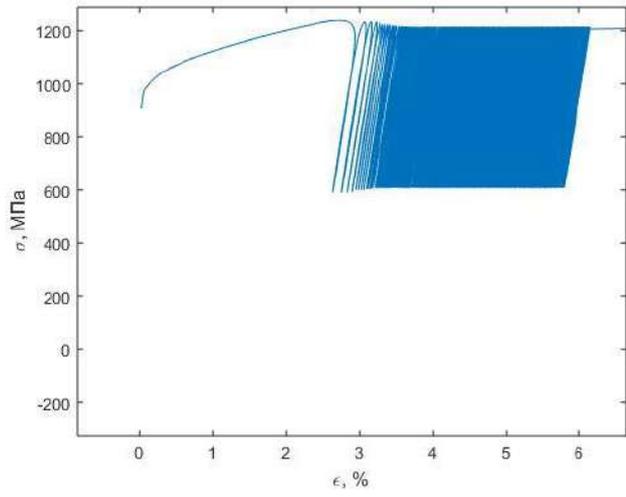
е)

Рисунок 4.18 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВЖ175 при $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_\sigma = 0$

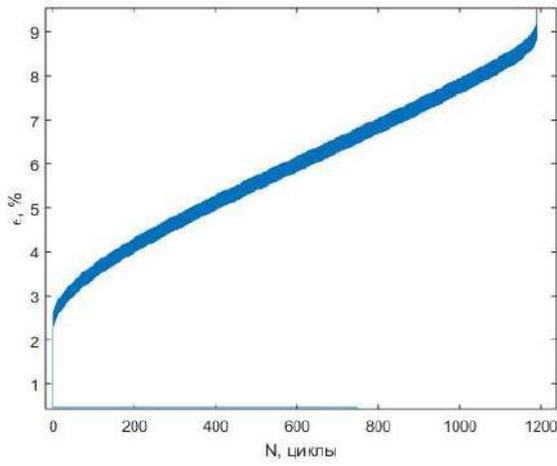


а)

$\sigma_{\max} = 1200 \text{ МПа}, N=494.$

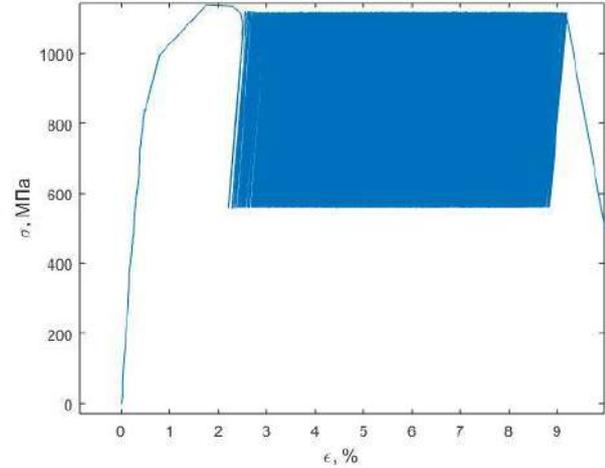


б)

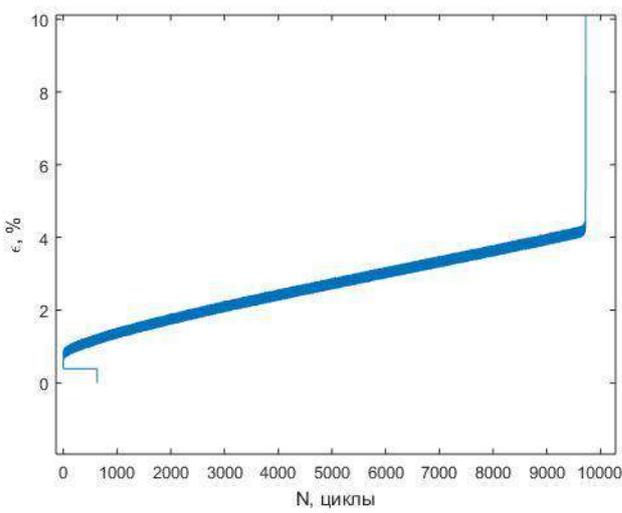


в)

$\sigma_{\max} = 1100 \text{ МПа}, N=1189.$

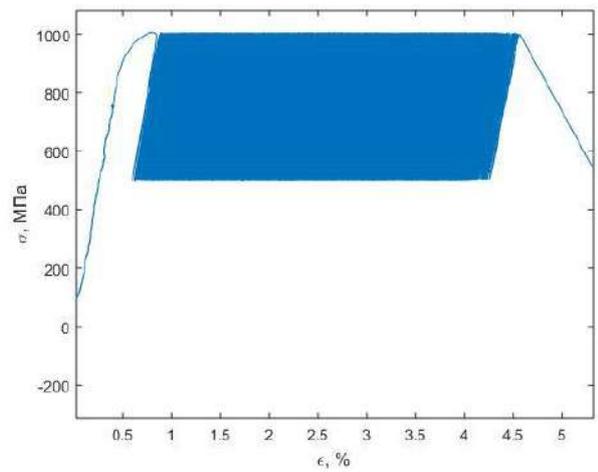


г)



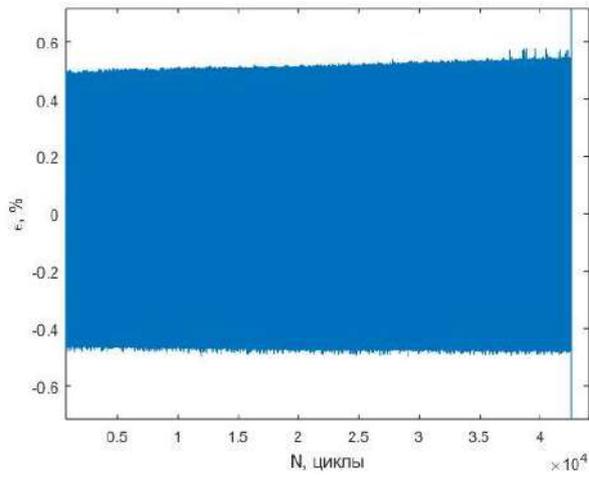
д)

$\sigma_{\max} = 1000 \text{ МПа}, N=9726.$

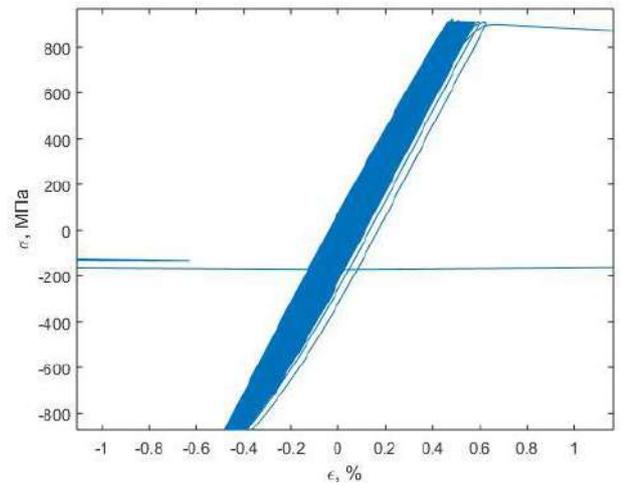


е)

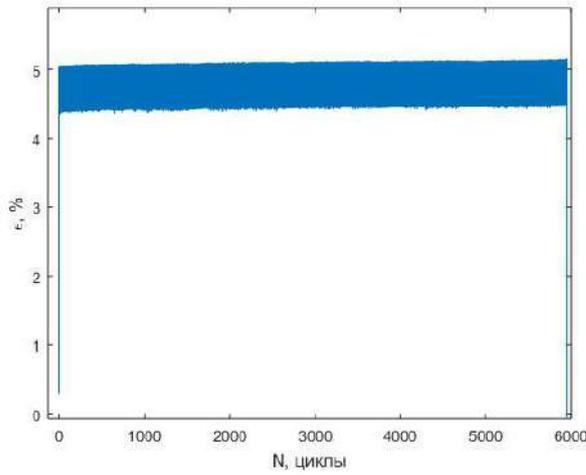
Рисунок 4.19 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВЖ175 при $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_\sigma = 0,5$



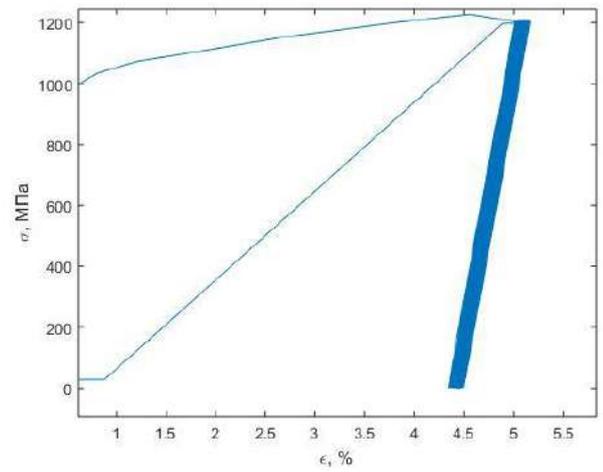
а) $\sigma_{\max} = 900 \text{ МПа}, N=42\ 559, R_{\sigma}=-1$



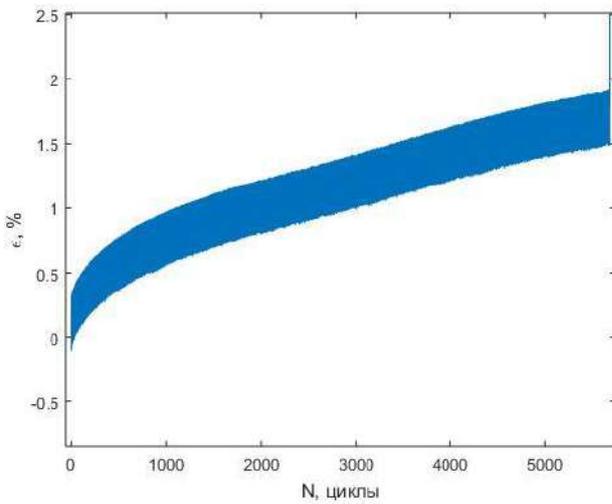
б)



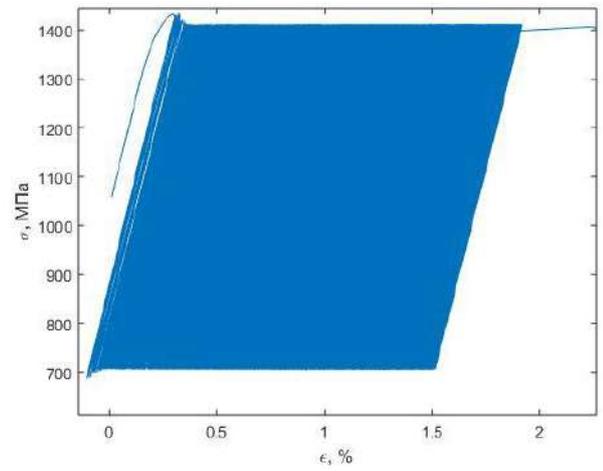
в) $\sigma_{\max} = 1200 \text{ МПа}, N=5955, R_{\sigma}=0$



г)

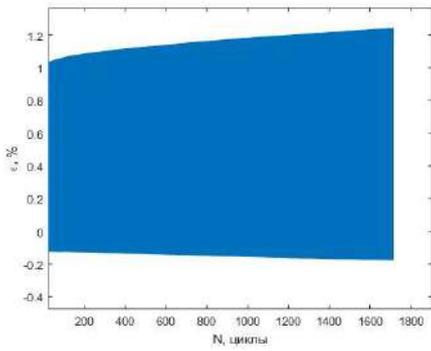


д) $\sigma_{\max} = 1400 \text{ МПа}, N=5688, R_{\sigma}=0,5$

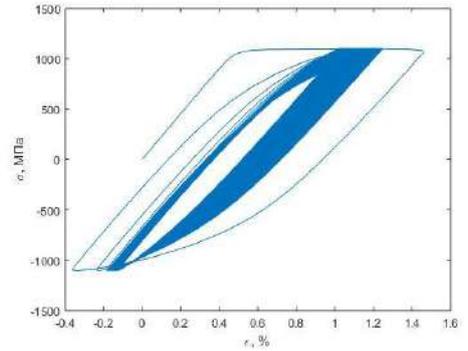


е)

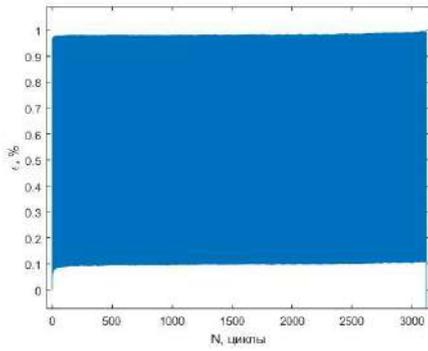
Рисунок 4.20 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВЖ175 при $T = 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$



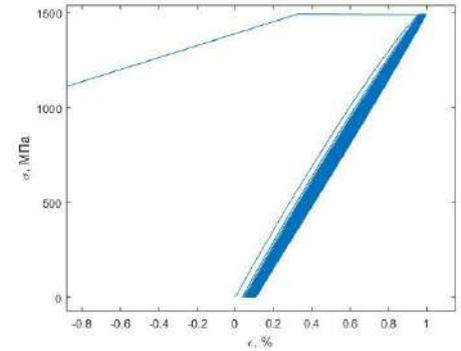
а) $\sigma_{\max} = 1100 \text{ МПа}, N=1713, R_{\sigma} = -1$



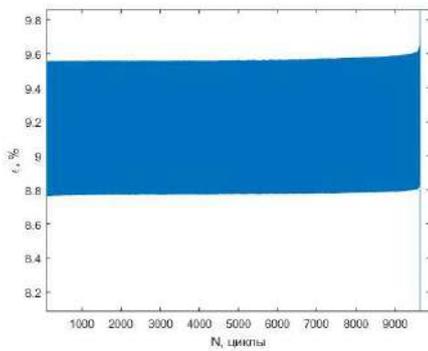
б)



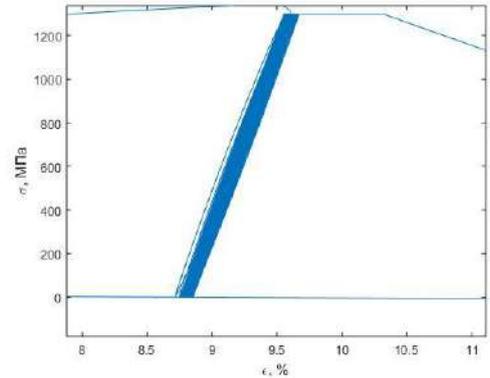
в) $\sigma_{\max} = 1500 \text{ МПа}, N=3124, R_{\sigma} = 0$



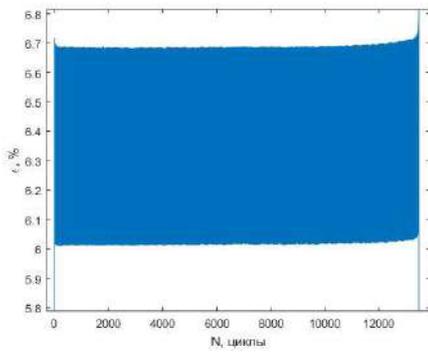
г)



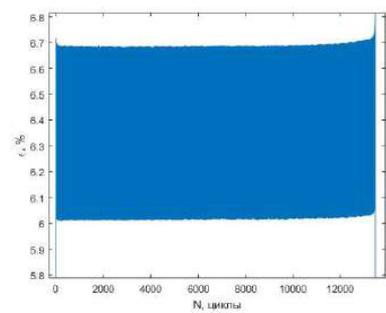
д) $\sigma_{\max} = 1300 \text{ МПа}, N=9\ 409, R_{\sigma} = 0$



е)

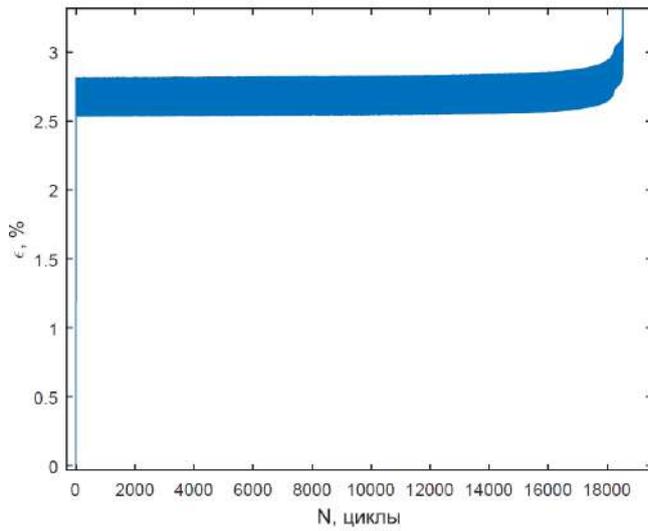


ж) $\sigma_{\max} = 1300 \text{ МПа}, N=13\ 474, R_{\sigma} = 0$

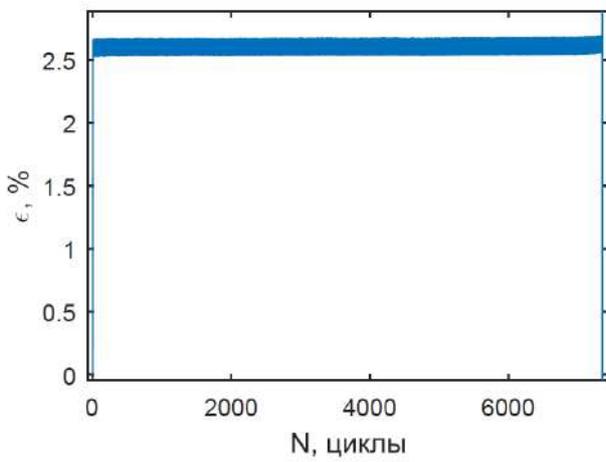
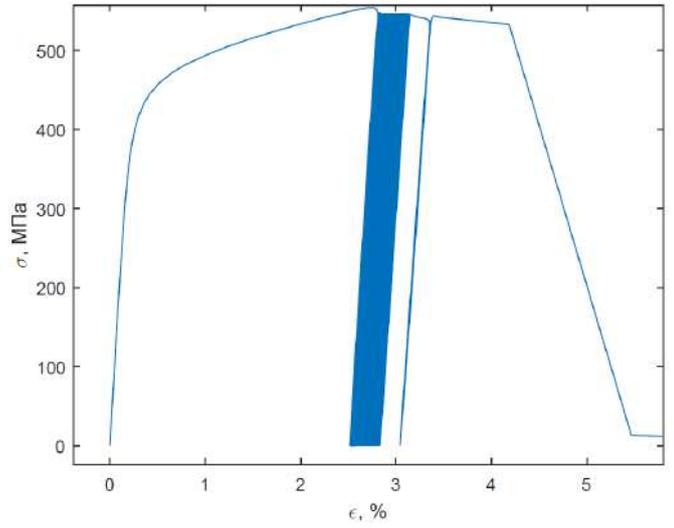


з)

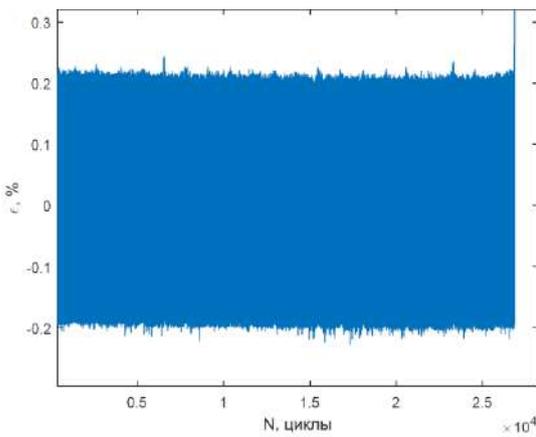
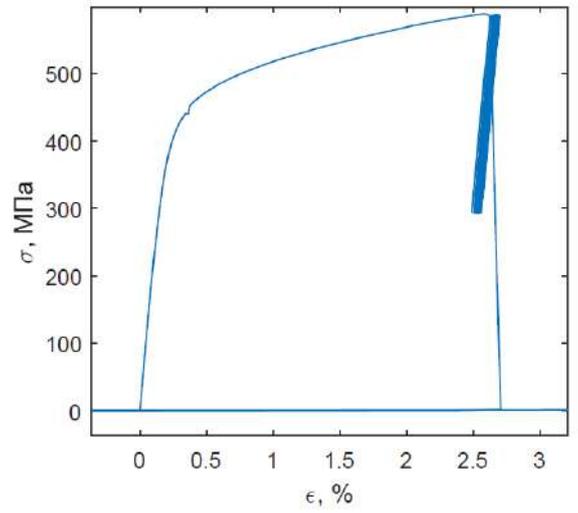
Рисунок 4.21 – Развитие деформации (а, в, д, ж) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е, з) образцов ВЖ175 при $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$



а) $T=20^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 540 \text{ МПа}$, $N=18\ 519$, $R_{\sigma}=0$



в) $T=20^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 585 \text{ МПа}$, $N=7357$, $R_{\sigma}=0,5$



д) $T=850^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 300 \text{ МПа}$, $N=26847$, $R_{\sigma}=-1$

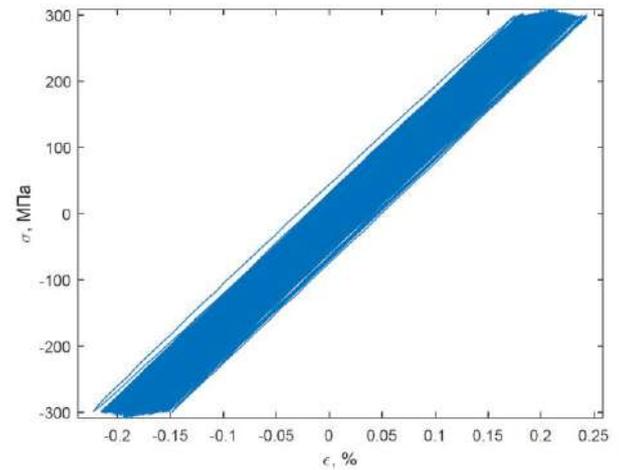
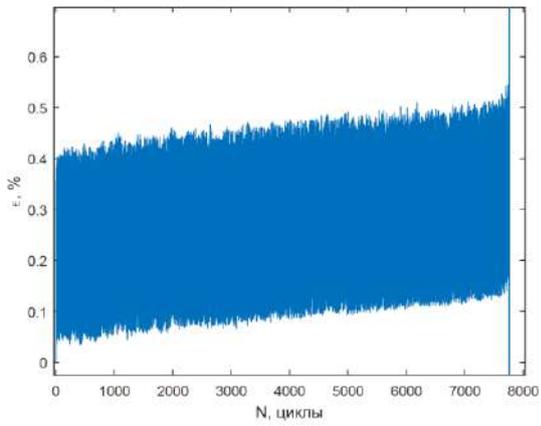
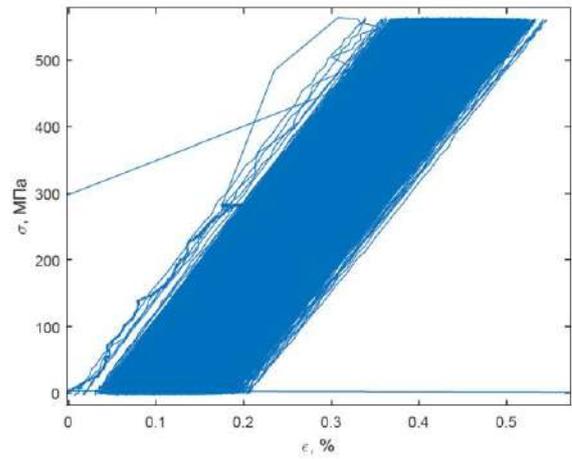


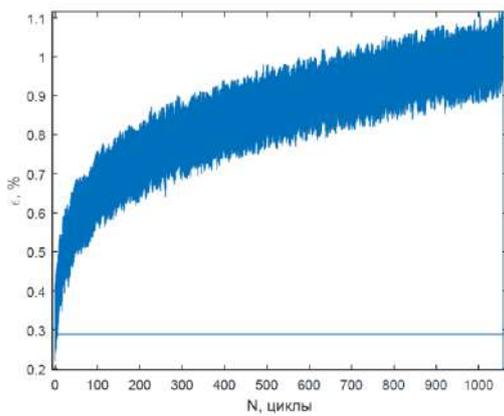
Рисунок 4.22 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВКНА-1ВР



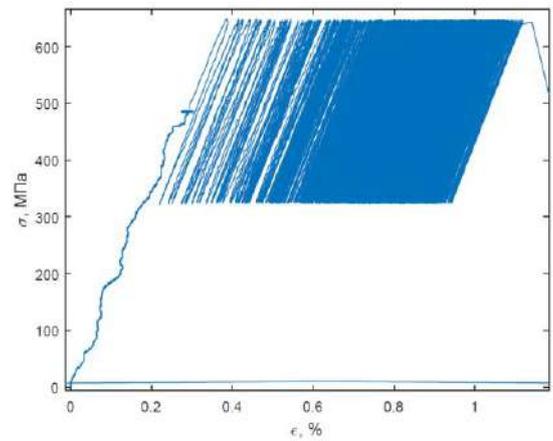
а) $T=850^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 640 \text{ МПа}$, $N=1058$, $R_{\sigma}=0,5$



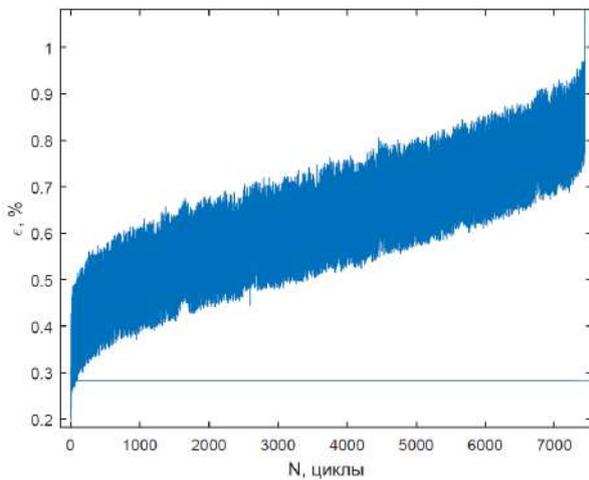
б)



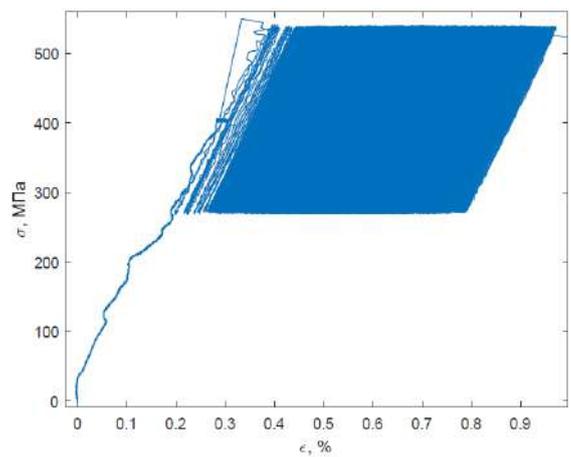
в) $T=850^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 540 \text{ МПа}$, $N=7441$, $R_{\sigma}=0,5$



г)

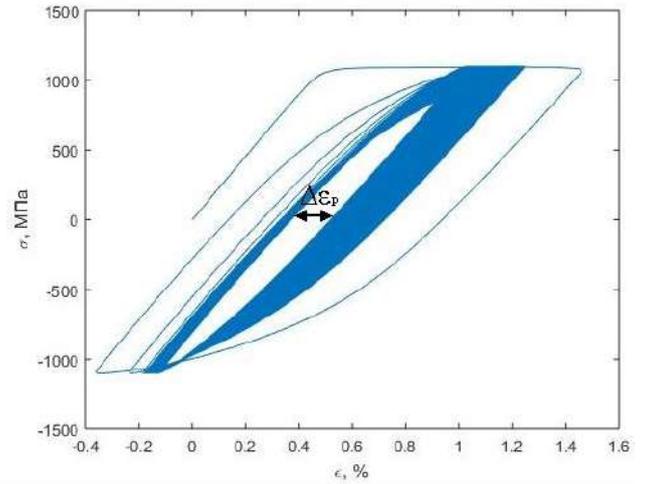
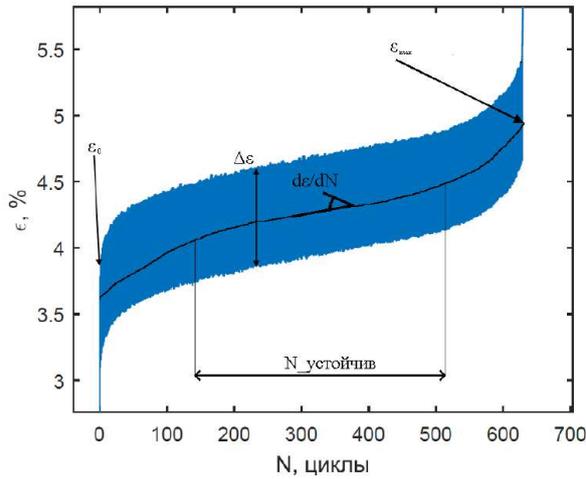


д) $T=850^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 560 \text{ МПа}$, $N=7759$, $R_{\sigma}=0$



е)

Рисунок 4.23 – Развитие деформации (а, в, д) и петель упруго-пластического гистерезиса (б, г, е) образцов ВКНА-1ВР



а)

б)

Рисунок 4.24 – Параметры циклического отклика при «мягком» цикле нагружения

4.4 Взаимосвязь "мягкого" и "жесткого" циклов нагружения

Испытания при «жестком» цикле нагружения были проведены при регистрации напряжений. Исследования поведения материала при «жестком» нагружении показали, что максимальное и минимальное напряжения большую часть испытания практически не меняются, поэтому для каждого испытания напряжения при количестве циклов $Nf/2$ были зафиксированы как характерные для соответствующего уровня размаха деформации.

В результате анализа полученных данных было выявлено, что при «жестком» нагружении максимальное и минимальное напряжения, в основном, стабилизируются после 100-го цикла и сохраняются постоянными или незначительно монотонно убывают практически до разрушения, т.е. практически реализуется «мягкое» нагружение. Для дальнейшего анализа были зафиксированы значения напряжений, соответствующие половине числа циклов до разрушения. Такая же закономерность наблюдается и для «мягкого» цикла применительно к деформациям. Также были зафиксированы деформации, соответствующие половине числа циклов до разрушения.

По этим данным было отмечено, что при «жестком» нагружении при $R=-1$ цикл напряжений также имеет $R = -1$, при других R , цикл напряжения изменяется в зависимости от амплитуды деформации от $R = -0.9$ до $R = 0$. Для «мягкого» цикла при $R = -1$ цикл деформаций имеет $R = -0.9$, а при остальных R , цикл деформаций, в основном, имеет $R = 0.9$.

По результатам испытаний при «жестком» цикле при $R=-1$ можно определить не только амплитуду деформации для заданной базы, но и предел по амплитуде напряжения.

Также можно предположить, что амплитуда напряжения, определенная для амплитуды деформации, соответствующей заданной базе будет являться пределом МЦУ для соответствующего $R\sigma$. Для проверки этого предположения по результатам испытания при «мягком» и «жестком» нагружении были построены диаграммы предельных амплитуд (рисунок 18 и 19) и эти точки были аппроксимированы полиномом второй степени.

На рисунке 4.25 представлены зависимости размахов деформаций и напряжений соответственно от относительного числа циклов (отнесенного к числу циклов до разрушения) при симметричном цикле нагружения. При «жестком» цикле (рис. 2.б) на всех рассмотренных уровнях деформаций наблюдается незначительное снижение размаха напряжения в течение 90% долговечности, а далее резкое падение напряжения, обусловленное распространением макротрещины и уменьшением эффективного сечения. То есть, на протяжении практически всего испытания наблюдается малоинтенсивное разупрочнение, столь малое, что сплав можно отнести к циклически стабильным. При «мягком» цикле нагружения размах деформации в цикле сохраняет стабильность большую часть испытания. На более высоких уровнях напряжения (400 и 500 МПа) после 75% долговечности наблюдается увеличение размаха деформации в цикле.

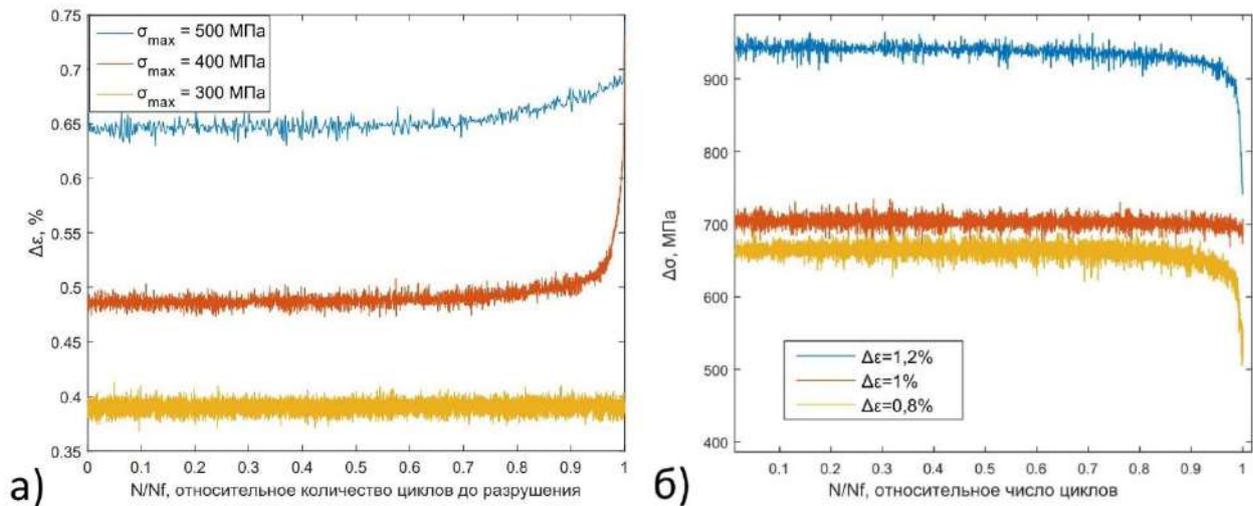


Рисунок 4.25 – Зависимость размахов: а) – деформации при «мягком» симметричном цикле и б) – напряжения при симметричном «жестком» цикле от относительного числа циклов до разрушения.

На рисунке 4.26 приведены зависимости коэффициента асимметрии по деформациям $R\varepsilon$ при «мягком» симметричном цикле и коэффициента асимметрии по напряжениям $R\sigma$ при «жестком» симметричном цикле от относительного числа циклов до разрушения. При контроле напряжения $R\varepsilon$ при всех уровнях нагружения на протяжении практически всего испытания колеблется около значения, близкого к минус единице. При контроле деформации в цикле $R\sigma$ также колеблется около близкого к минус единице значения, не зависящего от уровня

нагружения, на протяжении 90% длительности испытания, а далее смещается в сторону отрицательных значений. При обоих режимах нагружения яркого прогрессирования асимметрии не наблюдается.

Таким образом, при всех уровнях нагружения деформация при «мягком» симметричном цикле и напряжение при «жестком» симметричном цикле по максимальному и амплитудному значениям близки к постоянным на протяжении 70-100% от длительности испытания.

На рис. 4.27 приведены петли гистерезиса, полученные на наиболее высоких уровнях нагружения при циклах порядка 5%, 50%, 95%, 99% от количества циклов до разрушения. При обоих режимах нагружения размах пластической деформации в цикле на стабильном участке мал и составляет 0,015-0,02%. На финальной стадии испытания при «жестком» цикле нагружения он значительно возрастает, а при «мягком» происходит интенсивное накопление односторонних пластических деформаций.

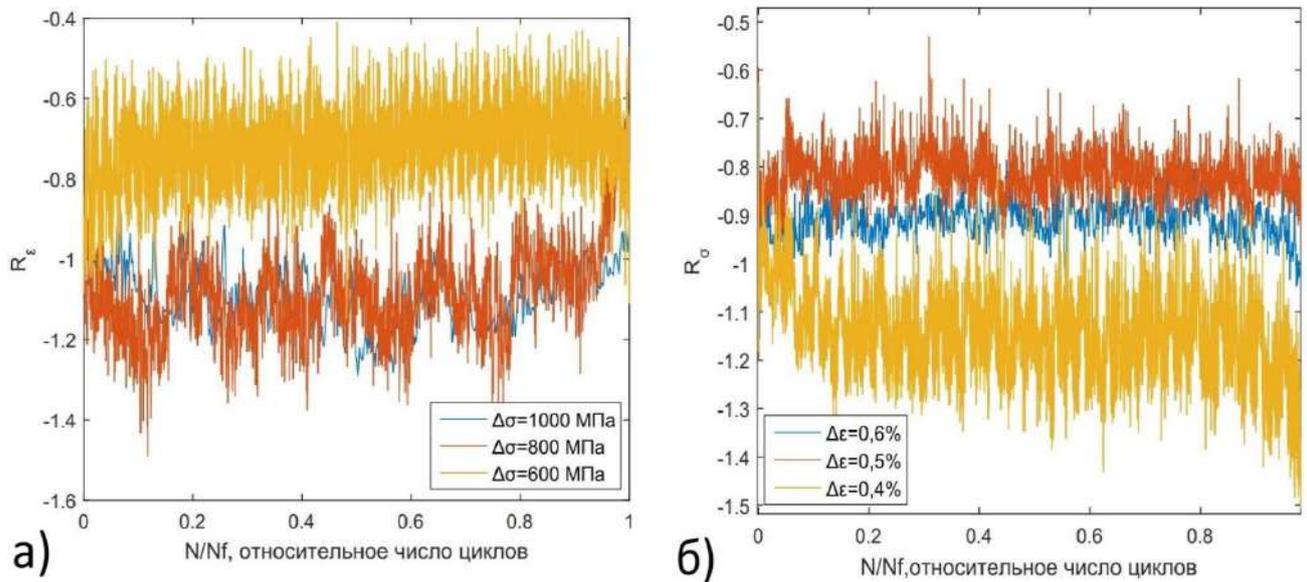


Рисунок 4.26 – Зависимость коэффициента асимметрии ВКНА-1ВР при 850°C от относительного числа циклов: а) при $R_\sigma = -1$; б) при $R_\epsilon = -1$

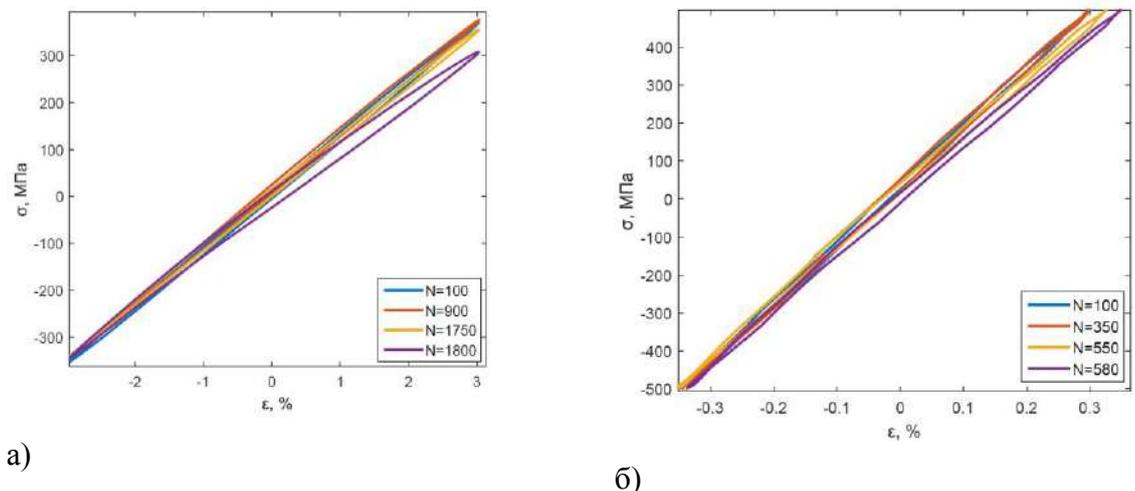


Рисунок 4.27 – Эволюция петель гистерезиса: а) при «жестком» симметричном цикле нагружения; б) при «мягком симметричном цикле нагружения

На рисунке 4.28 изображена диаграмма растяжения ВКНА-1ВР при температуре 850 °С и нанесенные на нее значения максимальных деформаций и напряжений, наблюдаемых при испытаниях на МЦУ при симметричном цикле при $N=N_f/2$. Результаты испытаний на МЦУ накладываются на диаграмму растяжения, что также демонстрирует циклическую стабильность материала.

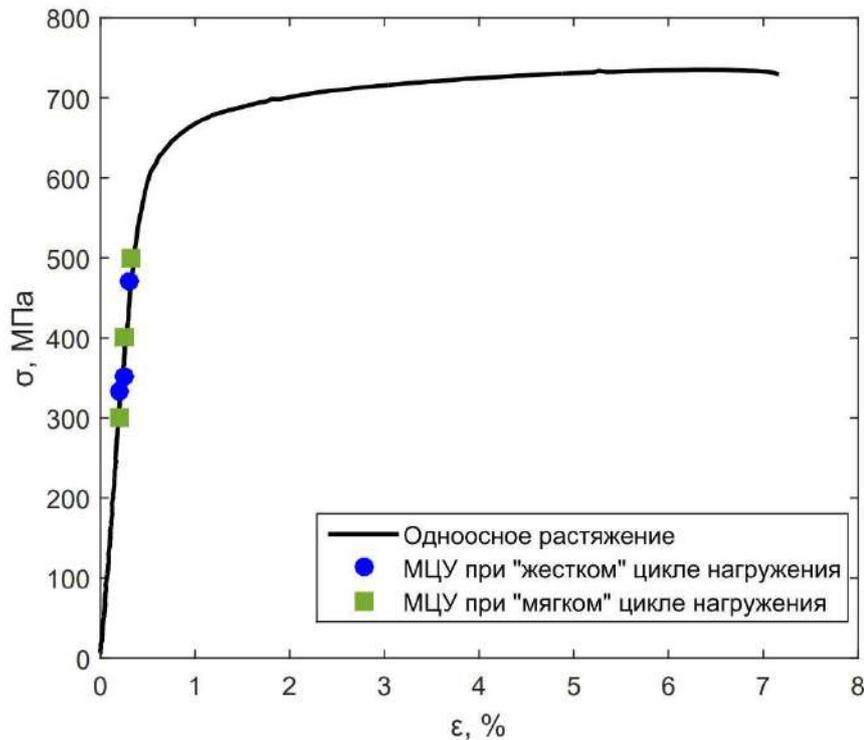


Рисунок 4.28 – . Диаграмма растяжения ВКНА-1ВР при $T=850$ °С и максимальные напряжения и деформации, наблюдаемые при испытаниях на МЦУ при $N=N_f/2$

Вышеперечисленные наблюдения сигнализируют о том, что условия испытаний ВКНА-1ВР при симметричных «мягком» и «жестком» режимах нагружения близки к эквивалентным.

На рисунке 4.29 представлены кривые усталости в двойных логарифмических координатах, на графики нанесены результаты испытаний при «мягком» и «жестком» симметричных циклах нагружения. На рисунке 4.29 а) представлена зависимость долговечности от размаха деформации, задаваемого (при «жестком» цикле нагружения) или определенного на стабильном участке деформирования (при «мягком» цикле нагружения). На рисунке 4.29 б) аналогично представлена зависимость долговечности от размаха напряжения, задаваемого или определенного в зависимости от режима нагружения. В обоих случаях зависимость аппроксимирована степенной функцией. Взаимное соответствие результатов испытаний, проведенных при контроле напряжения и деформации в цикле, наблюдается визуально, а также подтверждается близостью к единице коэффициента детерминации R^2 .

Следует отметить, что включение результатов испытаний при «жестком» цикле в выборку результатов испытаний при «мягком» цикле повышает коэффициент детерминации с 0.87 до 0.92, то есть, увеличивает соответствие результатов испытания выбранной модели.

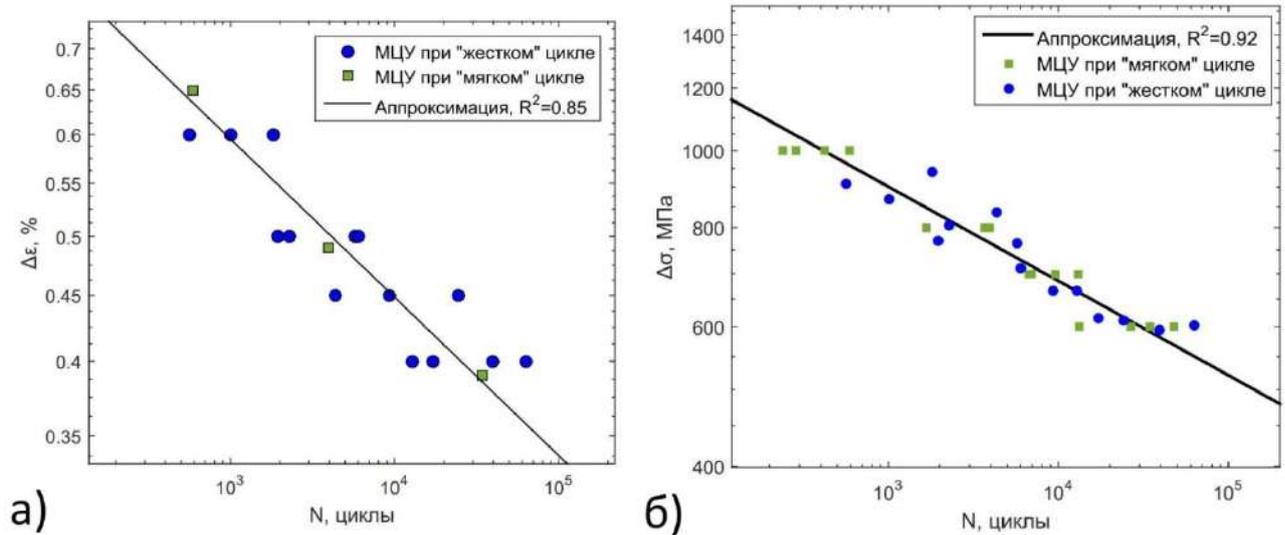


Рисунок 4.29 – Кривые усталости при «мягком» и «жестком» симметричных циклах нагружения, построенные: а) по деформациям; б) по напряжениям

Таким образом, для сплава ВКНА-1ВР при низшей эксплуатационной температуре 850 °С условия симметричного «жесткого» и «мягкого» циклов являются близкими к эквивалентным. Существенные отличия, обусловленные потерей несущей способности образцов, проявляются только на заключительной стадии испытаний. Таким образом, вследствие циклической стабильности материала испытания на МЦУ при «жестком» симметричном цикле являются исчерпывающими.

При «жестком» цикле нагружения при коэффициентах асимметрии $R_\varepsilon = 0$ и $R_\varepsilon = 0.5$ коэффициент асимметрии по медианным напряжениям R_σ (при числе циклов $N_f/2$) меняется в широком диапазоне, тогда как при $R_\varepsilon = -1$ коэффициент асимметрии по напряжениям тоже колеблется около значения $R_\sigma = -1$. В связи с этим были сопоставлены напряжения, возникающие при «жестком» цикле нагружения при коэффициенте асимметрии $R_\varepsilon = -1$, и напряжения, задаваемые при «мягком» цикле нагружения при $R_\varepsilon = -1$. В результате сопоставления линий регрессии при «жестком» и «мягком» циклах нагружения было установлено следующее [2]:

- при комнатной и эксплуатационных температурах предел выносливости на базе 10⁴ циклов, определенный по линии регрессии при «мягком» цикле нагружения, выше на 2-6%, чем предел, определенный при помощи регрессионного анализа медианных напряжений, возникающих при «жестком» цикле нагружения;

- при всех трех рассмотренных температурах линии регрессии, построенные по медианным напряжениям при «жестком» цикле нагружения, характеризуются большим углом наклона, чем линии регрессии при «мягком» цикле нагружения.

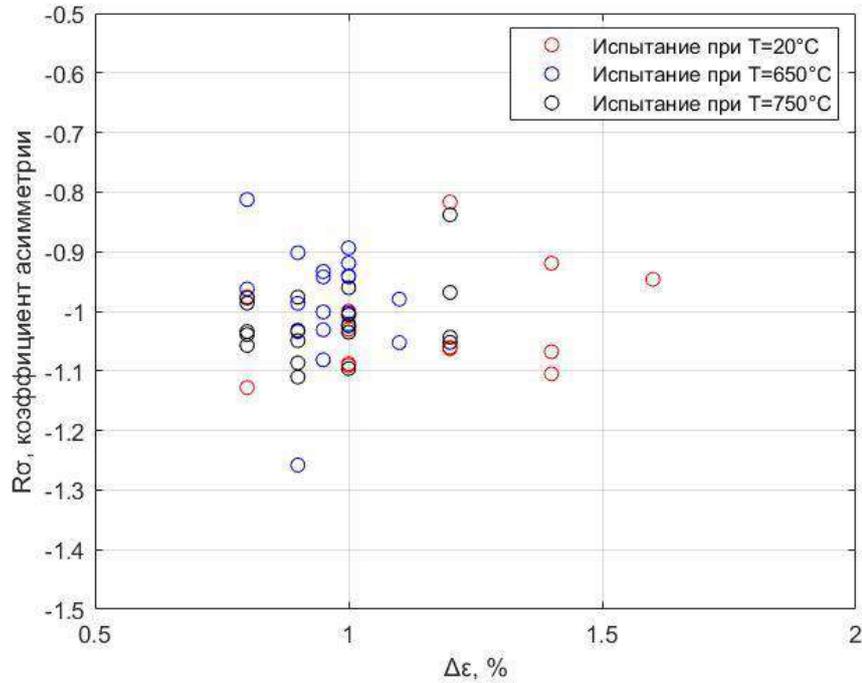


Рисунок 4.30 – Коэффициент асимметрии по медианным напряжениям $R\sigma$ при «жестком» цикле нагружения с коэффициентом асимметрии $R\epsilon = -1$

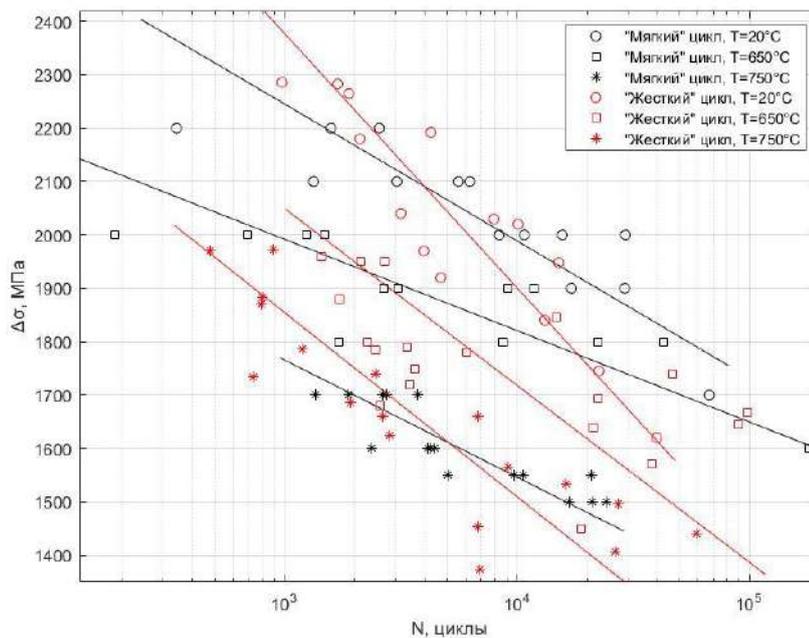


Рисунок 4.31– Сопоставление напряжений при «жестком» и «мягком» циклах нагружения

4.5 Заключение по четвертой главе

Построены кривые усталости образцов из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175, по которым определены пределы выносливости. Исследовано влияние параметров нагружения на пределы выносливости. Исследовано циклическое поведение образцов сплавов ВКНА-1ВР при температурах 20, 850 и 1050 °С и ВЖ175 при температурах 20, 650 и 750 °С при трех коэффициентах асимметрии ($R=-1, 0, 0.5$) при «мягком» и «жестком» нагружении в диапазоне долговечностей от 10^3 до 10^5 . Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Для обоих сплавов повышение температуры снижает сопротивление усталости вне зависимости от асимметрии цикла и режима нагружения («мягкий» или «жесткий»).

2. При симметричном жестком цикле нагружения ВЖ175 и ВКНА-1ВР циклически стабильны при исследуемых температурах.

3. При несимметричном жестком цикле наблюдается стадийность: первые 10% долговечности происходит интенсивное разупрочнение, идентифицируемое снижением амплитуды напряжения, следующие 80% долговечности происходит менее интенсивное разупрочнение.

4. При повышенных температурах при несимметричном «мягком» цикле нагружения у ВКНА-1ВР и ВЖ175 наблюдается накопление односторонних необратимых деформаций. Этот процесс происходит в три стадии, как и для статической ползучести: стадия затухающей ползучести, затем наиболее продолжительная стадия установившейся ползучести, затем завершающая стадия ускоренной ползучести. Скорость установившейся ползучести повышается с увеличением уровня нагружения и асимметрии цикла.

При комнатной температуре существенная деформация наблюдается в первом полуцикле, а дальнейшее увеличение односторонней деформации незначительно. При «мягком» симметричном цикле нагружения у ВЖ175 и ВКНА-1ВР не происходит накопления односторонних деформаций во всем рассмотренном диапазоне долговечностей и температур.

5. При симметричном цикле нагружения образцов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при всех рассмотренных температурах циклическое деформирование при «мягком» и «жестком» циклах отличается незначительно, что позволяет оценивать долговечность при «мягком» цикле по результатам «жесткого» нагружения и наоборот. Это объясняется циклической стабильностью материалов и отсутствием циклической ползучести.

При асимметричном же нагружении прогнозирование результатов испытаний при «мягком» цикле по результатам испытаний при «жестком» цикле и наоборот затруднительно из-за накопления односторонних деформаций при «мягком» цикле и релаксации среднего напряжения при «жестком» цикле нагружения.

5 МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА

5.1. Обобщенные кривые усталости. Обоснование выбора силового подхода.

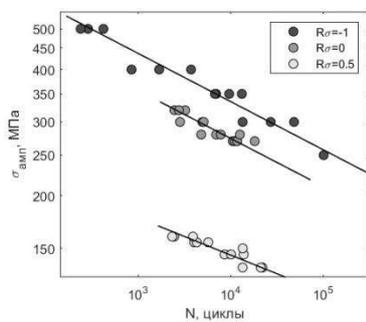
Зависимость числа циклов до разрушения от параметра нагружения аппроксимируют степенным уравнением:

$$N_p = aP^b; \quad (5.1)$$

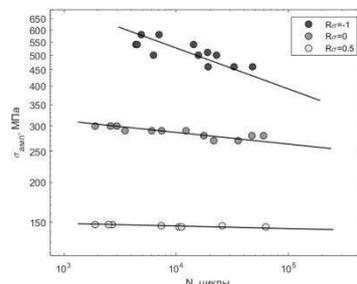
$$\log_{10}(N_p) = b \cdot \log_{10}P + \log_{10}a,$$

где N_p – количество циклов до разрушения; P – параметр нагружения, в качестве которого обычно выступает амплитуда или максимальное значение напряжения или деформации в цикле; a и b – константы.

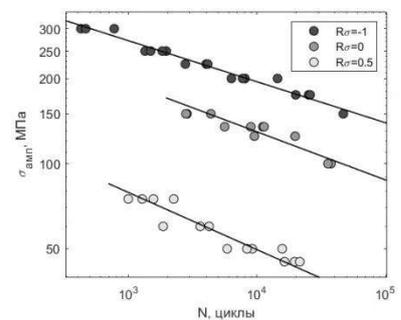
На рисунках 5.1 и 5.2 представлены кривые усталости для сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 соответственно в двойных логарифмических координатах. Для испытаний при «жестком» цикле параметр P из уравнения (5.1) – амплитуда деформации ϵ_a , для испытаний при «мягком» цикле – амплитуда напряжения σ_a . Константы уравнения (5.1) определены методом наименьших квадратов с использованием регрессионного анализа. При этом была принята гипотеза о нормальности распределения долговечности на каждом уровне нагружения, что характерно для исследуемого явления – малоцикловой усталости металлов.



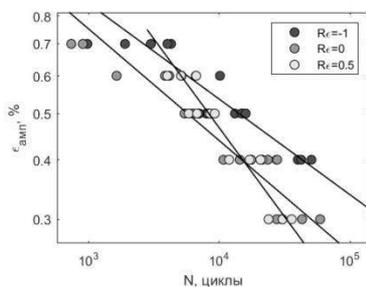
а) $T=20^\circ\text{C}$, «мягкий» цикл



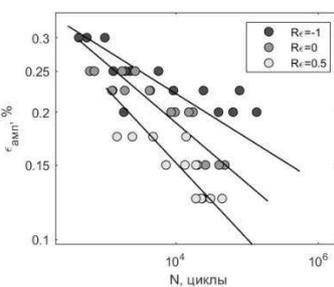
б) $T=850^\circ\text{C}$, «мягкий» цикл



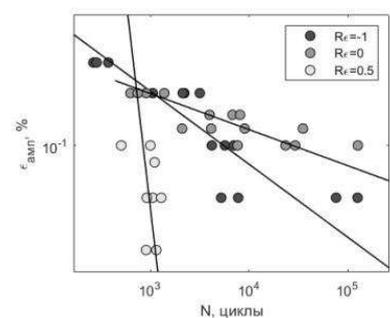
в) $T=1050^\circ\text{C}$, «мягкий» цикл



г) $T=20^\circ\text{C}$, «жесткий» цикл

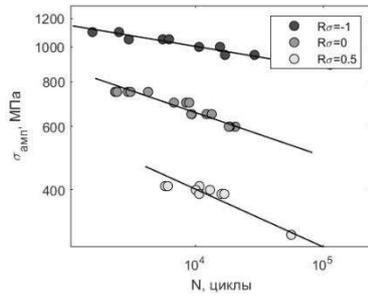


д) $T=850^\circ\text{C}$, «жесткий» цикл

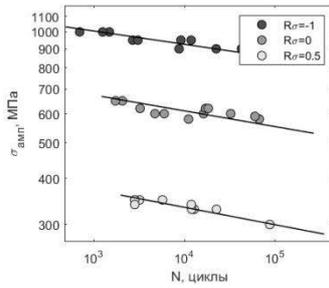


е) $T=1050^\circ\text{C}$, «жесткий» цикл

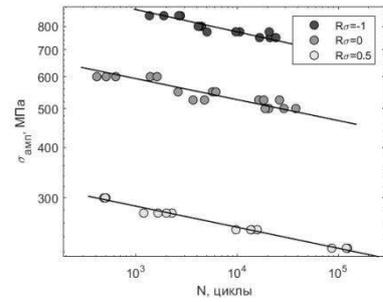
Рисунок 5.1 – Кривые усталости ВКНА-1ВР.



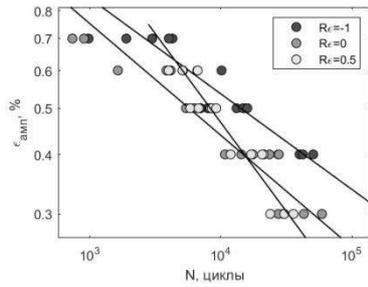
а) T=20°C, «мягкий» цикл



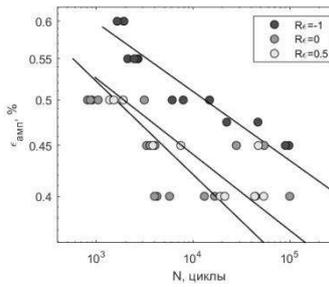
б) T=650°C, «мягкий» цикл



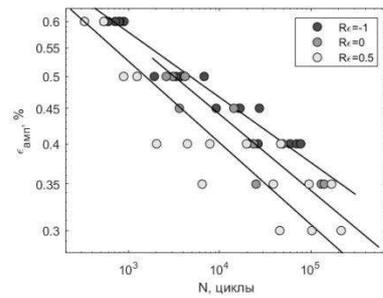
в) T=750°C, «мягкий» цикл



г) T=20°C, «жесткий» цикл



д) T=650°C, «жесткий» цикл



е) T=750°C, «жесткий» цикл

Рисунок 5.2 – Кривые усталости ВЖ175.

В качестве критерия соответствия уравнения (5.1) результатам испытаний выбран коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.2)$$

где y_i – фактическое значение зависимой переменной, \hat{y}_i – расчетное значение зависимой переменной, \bar{y} – среднее значение зависимой переменной, n – количество пар значений зависимой и независимой переменных. Для уравнения (5.1) зависимой переменной является логарифм числа циклов до разрушения, независимой – логарифм параметра нагружения. Коэффициент детерминации численно характеризует долю дисперсии зависимой переменной, объясненной моделью, – чем он ближе к единице, тем лучше модель соответствует данным.

В таблице 5.1 приведены коэффициенты детерминации R^2 для выборок, представленных на рисунках 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1. Коэффициенты детерминации R^2 для выборок результатов испытаний.

Сплав	T, °C	R _ε =-1	R _ε =0	=0,5	R _σ =-1	R _σ =0	R _σ =0,5	среднее по	
								R _ε	R _σ
ВКНА-1BP	20	0,64	0,70	0,76	0,63	0,74	0,65	0,70	0,67
	850	0,57	0,83	0,65	0,94	0,81	0,85	0,68	0,87
	1050	0,78	0,71	0,16	0,97	0,84	0,89	0,55	0,90
ВЖ175	20	0,88	0,90	0,89	0,90	0,90	0,83	0,89	0,88
	650	0,90	0,48	0,75	0,79	0,53	0,83	0,71	0,72
	750	0,95	0,83	0,79	0,85	0,85	0,99	0,86	0,90

Для выбора модели, позволяющей оценить долговечность при произвольном коэффициенте асимметрии при нагружении, можно использовать силовой, деформационный или энергетический подход [123]. В первом случае долговечность зависит от напряжения в цикле, во втором – от деформации, в третьем – и от деформации, и от напряжения. Одна из задач работы – определить, можно ли с использованием какого-либо параметра нагружения оценить долговечность одновременно и при «мягком», и при «жестком» нагружении. В настоящей работе исследована применимость моделей, основанных исключительно на силовом подходе, т.е. моделей, в которых при «мягком» цикле долговечность зависит от задаваемого напряжения, а при «жестком» – от характерного зарегистрированного напряжения, а именно, напряжения на стабильном срединном цикле.

Силовой подход имеет очевидный недостаток – в уравнениях в явном виде не фигурируют пластические деформации, являющиеся одним из основных повреждающих факторов при малоциклового усталости. Однако у силового подхода есть и преимущества. В настоящей работе выбран силовой подход по следующим причинам:

1) Исследуемые сплавы циклически стабильны – при «жестком» цикле нагружения амплитуда напряжения в процессе испытания меняется незначительно. Характер изменения среднего напряжения цикла зависит от условий испытаний, но напряжение на срединном цикле можно использовать как характерное, так как оно не изменяется интенсивно на протяжении большей части испытания. Типовой пример развития среднего и амплитудного напряжений показан на рисунке 5.3.

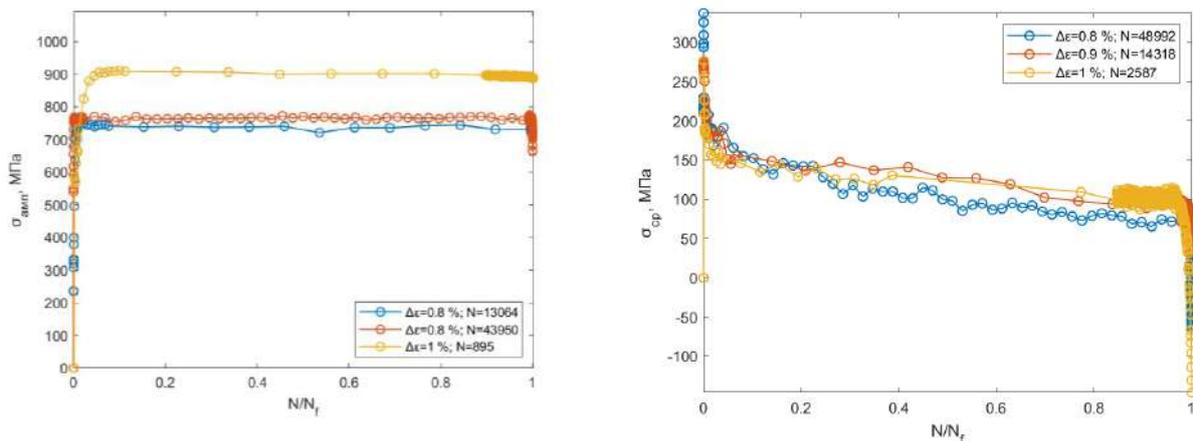


Рисунок 5.3 – амплитудные и средние напряжение в цикле образцов из ВЖ175 при $R_\epsilon = 0$, $T = 750$ °С.

При этом изменение неконтролируемого параметра при «мягком» нагружении – деформации в цикле – характеризуется множеством параметров, как показано на рисунке 5.4: размах деформации $\Delta\epsilon$, начальная деформация ϵ_0 , накопленная деформация циклической

ползучести ε_{\max} , длительность стадии установившейся циклической ползучести $N_{уст}$, скорость накопления деформации циклической ползучести на этом участке $d\varepsilon/dN$. Большое количество параметров, которые могут оказывать влияние на долговечность, делает использование деформационного и энергетического подходов затруднительным.

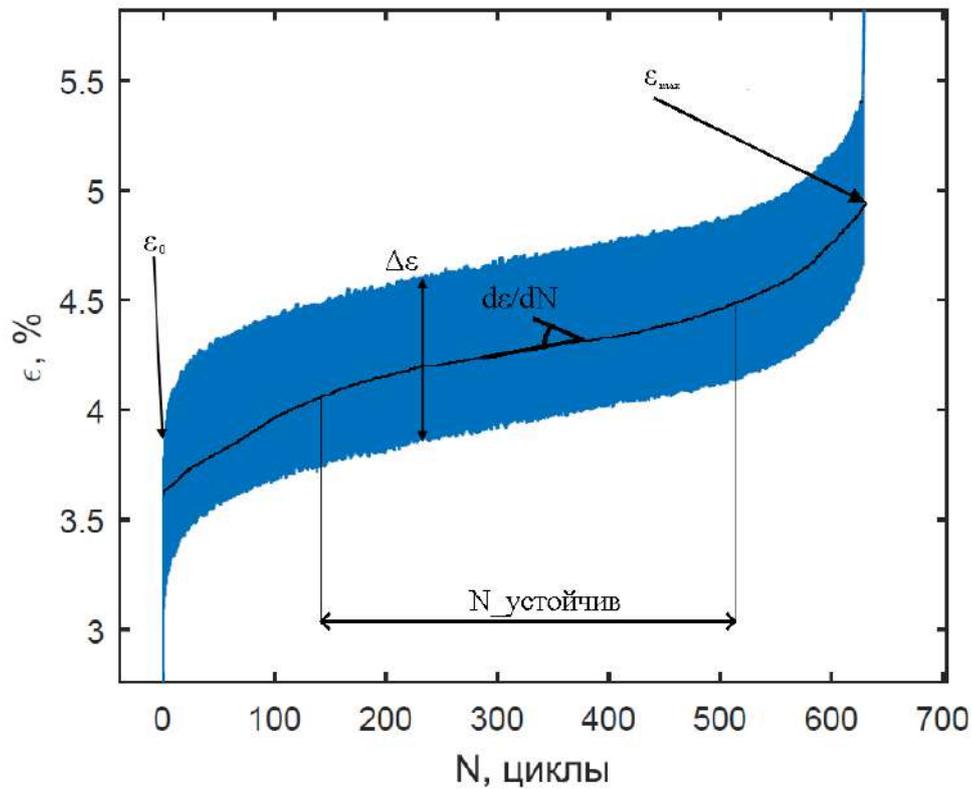


Рисунок 5.4 – развитие деформации в цикле образца из ВЖ175 при «мягком» нагружении. $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_{\sigma}=0$; $\sigma_{\max} = 1200\text{ Мпа}$; $N=494$ цикла

2) При «жестком» нагружении для одного из двух исследуемых сплавов – ВКНА-1ВР – изменение размаха пластической деформации специфично – ее пики либо отсутствуют, либо приходятся на первые и последние циклы, как показано на рисунке 5.5. Обычно в качестве характерного значения пластической деформации выбирают значение на срединном цикле, но для ВКНА-1ВР такой подход не корректен. Это делает применение деформационного подхода затруднительным.

3) При «жестком» цикле обычно регистрируют нагрузку в соответствии с требованиями стандартов на испытания на малоцикловую усталость, тогда как при «мягком» нагружении запись деформации факультативна. В связи с этим охват области применения силового подхода шире, чем деформационного и энергетического.

В таблице 1.2 приведены рассмотренные силовые модели, соответствующие им параметры нагружения $P=\sigma_{\text{экв}}$, а также уравнения для оценки долговечности при произвольной

асимметрии цикла при «мягком» или «жестком» нагружении. Используются следующие обозначения:

σ_b – предел прочности;

σ_{cp} – среднее напряжение цикла;

σ_a – амплитуда напряжения цикла;

σ_{max} – максимальное напряжения цикла;

a, b, α, γ, n – параметры уравнений, определяемые экспериментально.

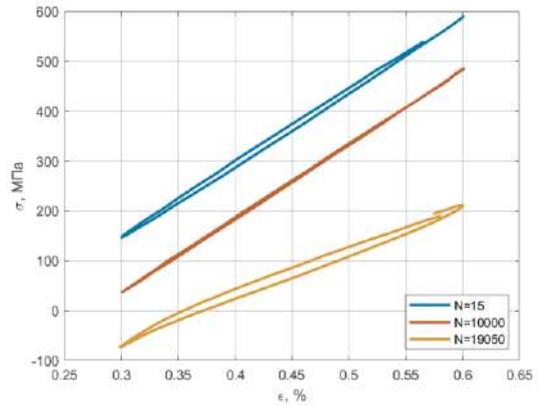
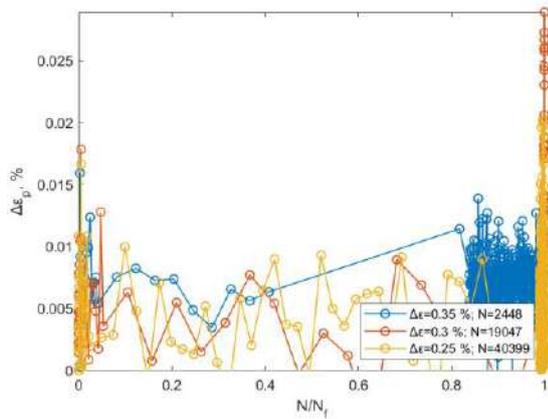


Рисунок 5.5 – изменение пластической деформации в цикле (слева) и развитие петель упруго-пластического гистерезиса (справа, для $\Delta\epsilon=0,3\%$) образцов из ВКНА-1ВР при $T=850^{\circ}\text{C}$; $R_{\epsilon}=0.5$

Следует отметить, что параметры цикла нагружения σ_{cp} , $\sigma_{амп}$, σ_{max} , R_{σ} не являются независимыми – если известны любые два из них, то оставшиеся можно определить. Таким образом, в приведенных в таблице 1.2 уравнениях долговечность зависит от коэффициента асимметрии цикла, но не выражена в явной форме.

Таблица 5.2. Выражения для эквивалентного напряжения и соответствующие им уравнения для оценки долговечности

Название	Выражение
Модели с двумя регрессионными параметрами (a, b)	
Модель Гудмана	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}} \right)^b \quad (5.3)$
Модель Гербера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b} \right)^2}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b} \right)^2} \right)^b \quad (5.4)$
Модель Смита-Уотсона-Топпера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{cp}}; \quad N = a \cdot \left(\sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{max}} \right)^b \quad (5.5)$

Модель Марина	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}\right)^2}} \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}\right)^2}} \right)^b \quad (5.6)$
Модели с тремя регрессионными параметрами ($a, b, \alpha/\gamma/n$)	
Модель Квофи	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{e^{-\alpha \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}}}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{e^{-\alpha \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}}} \right)^b \quad (5.7)$
Модель Уокера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_a^\gamma \cdot \sigma_{\text{max}}^{1-\gamma}; \quad N = a \cdot (\sigma_a^\gamma \cdot \sigma_{\text{max}}^{1-\gamma})^b \quad (5.8)$
Модель типа Гудмана-Гербера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}\right)^\pi} \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}\right)^\pi} \right)^b \quad (5.9)$

Модели Гудмана и Гербера получены с использованием классических уравнений, используемых для построения диаграмм предельных амплитуд:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B} = 1, \quad (5.9)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_B}\right)^2 = 1, \quad (5.10)$$

где σ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле нагружения, а где σ_a и $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее и амплитудное значения напряжения, соответствующего пределу выносливости при произвольной асимметрии цикла.

Модель типа Гудмана-Гербера предложена авторами настоящей статьи и является некоторым их обобщением – если $n=1$, предложенная модель эквивалентна модели Гудмана, а если $n=2$, то модели Гербера. Информация об остальных моделях из таблицы 5.2 изложена в использованных источниках.

Модели с двумя и тремя регрессионными параметрами приведены обособленно. Модели с тремя регрессионными параметрами дополнительно содержат константу, характеризующую чувствительность материала к асимметрии цикла или, что то же, к среднему напряжению цикла. Однако определить эту константу можно только экспериментально по результатам испытаний при нескольких коэффициентах асимметрии. В связи с этим модели с двумя параметрами особенно практически полезны в случаях, когда испытания проведены при одном коэффициенте асимметрии, а спрогнозировать долговечность нужно при другом.

Для моделей с двумя параметрами из таблицы 5.2 определены эквивалентные напряжения для каждого испытанного образца. Для «мягкого» цикла они выражены через контролируемые среднее и амплитудное напряжения цикла. Для «жесткого» же цикла среднее и амплитудное напряжение были определены на срединном цикле $N_p/2$. Таким образом, было

получено по шесть обобщенных выборок для каждой модели: ВЖ175 при 20°C, ВЖ175 при 650°C, ВЖ175 при 750°C, ВКНА-1Вр при 20°C, ВКНА-1Вр при 850°C, ВКНА-1Вр при 1050°C. В каждой из этих выборок были объединены результаты испытаний, полученные при трех коэффициентах асимметрии при «мягком» и при «жестком» нагружении. Зависимости долговечности от эквивалентного напряжения аппроксимированы степенным уравнением, принимающим вид линейной функции после логарифмирования обеих частей:

$$N_p = a \cdot \sigma_{\text{ЭКВ}}^b; \quad (5.11)$$

$$\log_{10}(N_p) = b \cdot \log_{10} \sigma_{\text{ЭКВ}} + \log_{10} a,$$

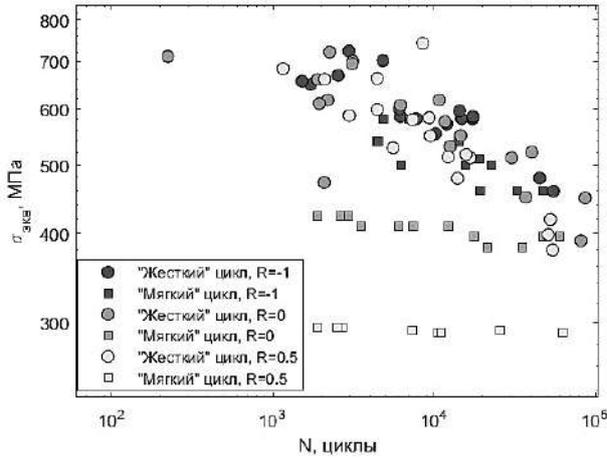
5.2 Оценка долговечности при произвольной асимметрии цикла

На рисунках 5.5-5.10 приведены эквивалентные напряжения и соответствующие им циклы до разрушения в соответствии с приведенными в таблице 5.2 моделями с двумя регрессионными параметрами. Для оценки применимости моделей выбран коэффициент детерминации R^2 . В случаях, когда $R^2 > 0,5$, приведены обобщенные кривые усталости, соответствующие уравнениям (5.3)-(5.9). Как показано в таблице 5.3, ни одна из рассмотренных моделей не может быть применима для корректной оценки долговечности при произвольных условиях нагружения одновременно при всех рассмотренных температурах и для обоих сплавов. Однако для отдельных обобщенных выборок найдены удовлетворительно подходящие модели с двумя регрессионными параметрами. Примеры продублированы на рисунке 5.11.

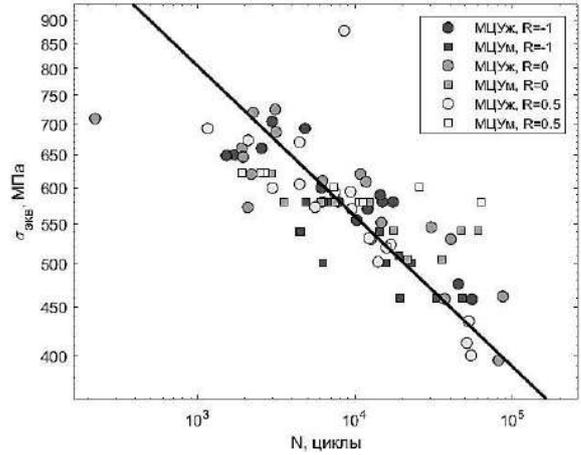
В процессе работы с результатами было обнаружено, что одна из моделей – модель Смитта-Уотсона-Топпера – подходит для обобщения выборок результатов испытаний при жестком цикле при всех трех коэффициентах асимметрии. Кроме того, по полученным кривым можно прогнозировать и результаты испытаний при мягком симметричном цикле нагружения. Это наблюдается для обоих сплавов для всех трех температур, как показано на рисунке 5.12. Параметры a и b модели Смитта-Уотсона-Топпера определены для каждой температуры, коэффициенты детерминации приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.3. Коэффициенты детерминации R^2 для обобщенных кривых усталости.

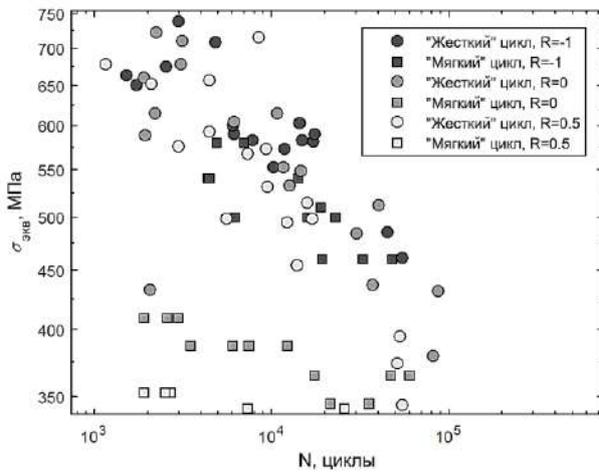
Модель	ВКНА-1Вр			ВЖ175		
	20°C	850°C	1050°C	20°C	650°C	750°C
Смитт-Уотсон-Топпер	0,16	0,66	0,17	0,42	0,19	0,16
Гудман	0,58	0,53	0,14	0,19	0,40	0,58
Гербер	0,23	0,68	0,11	0,47	0,20	0,23
Марин	0,38	0,51	0,13	0,42	0,20	0,38



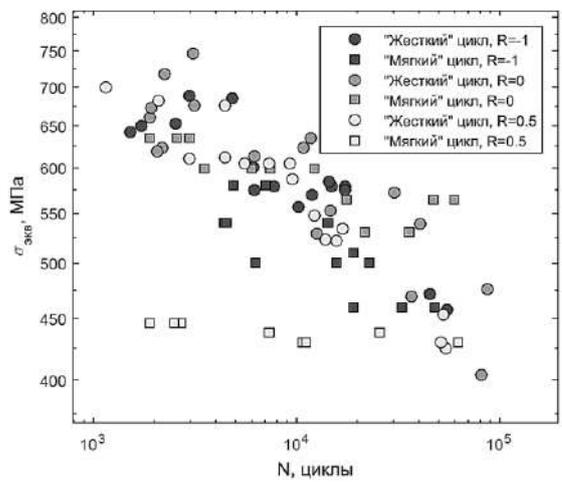
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

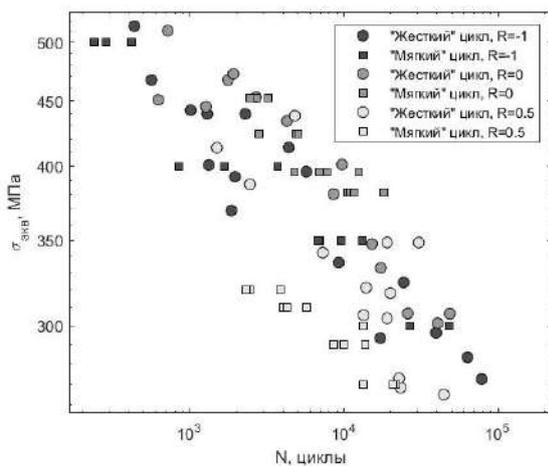


в) Модель Гербера

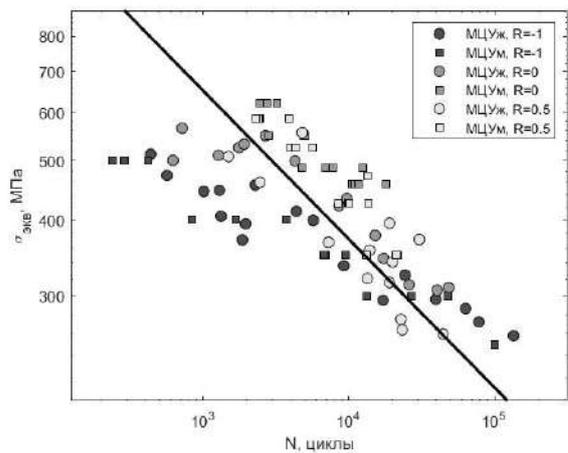


г) Модель Марина

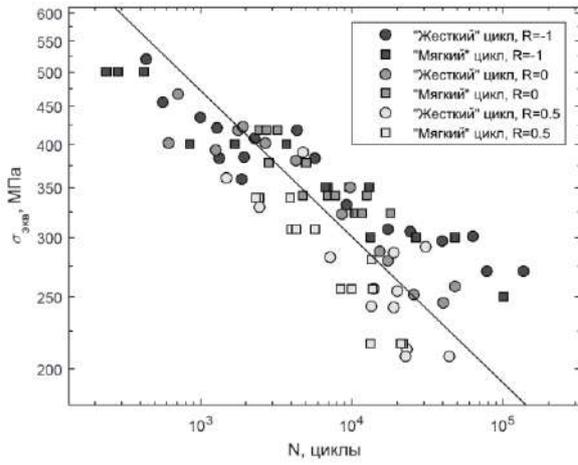
Рисунок 5.5 – Обобщение результатов испытаний ВКНА-1ВР на МЦУ при 20 °С



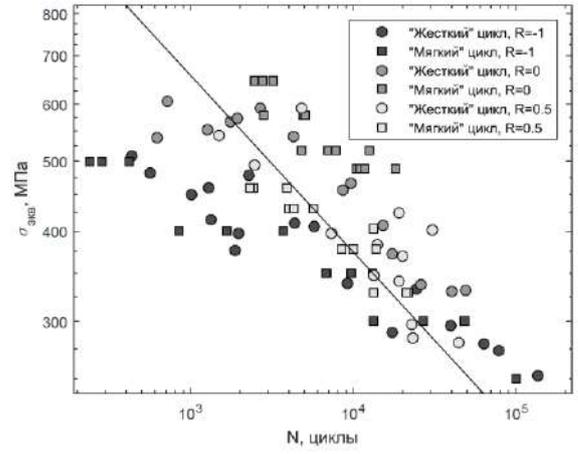
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

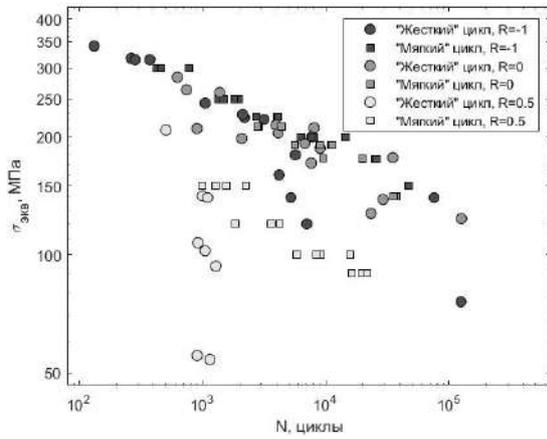


в) Модель Гербера

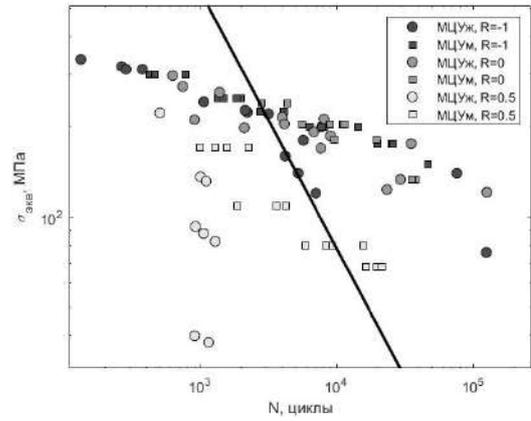


г) Модель Марина

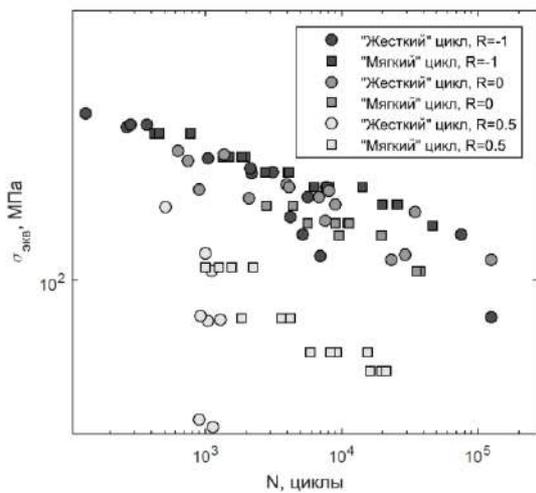
Рисунок 5.6 – Обобщение результатов испытаний ВКНА-1ВР на МЦУ при 850 °С



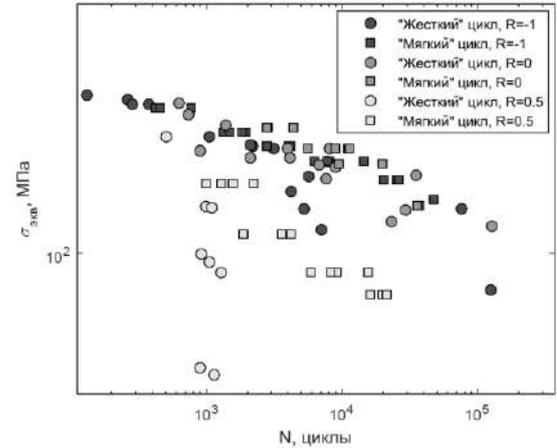
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

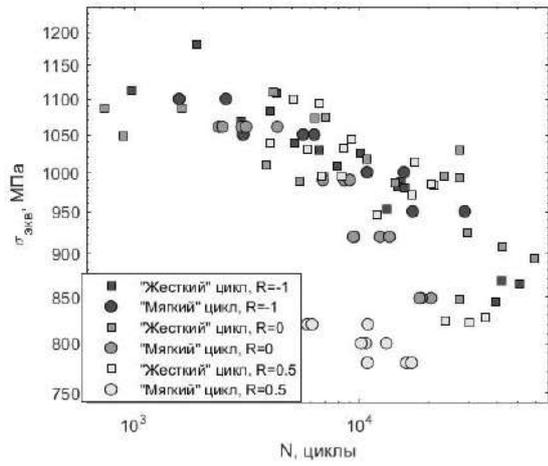


в) Модель Гербера

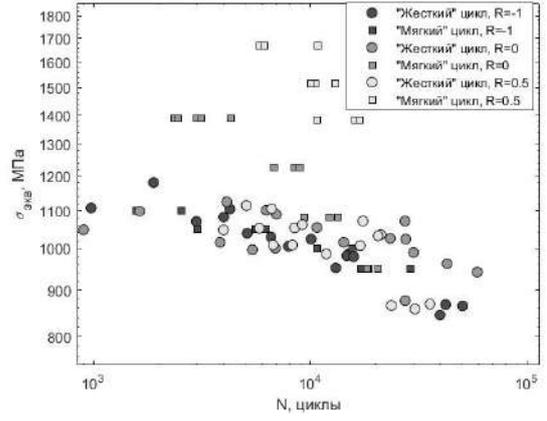


г) Модель Марина

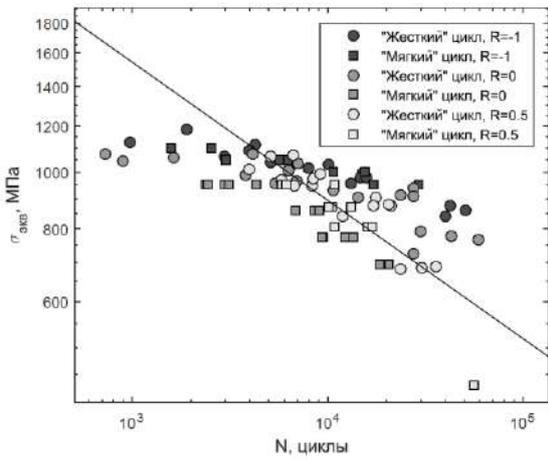
Рисунок 5.7 – Обобщение результатов испытаний ВКНА-1ВР на МЦУ при 1050 °С



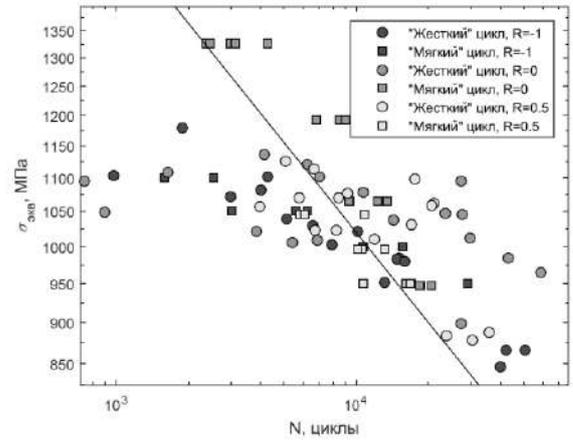
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

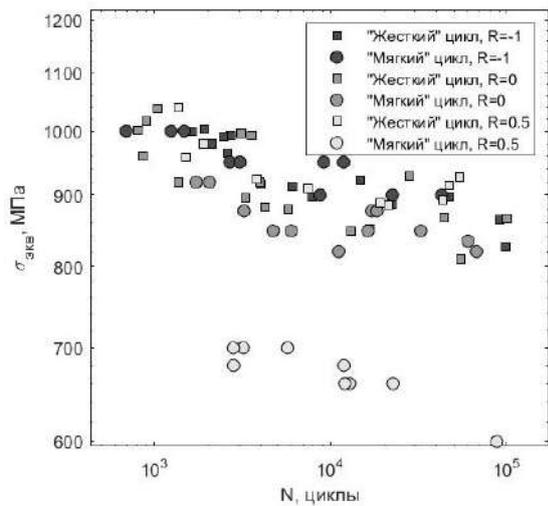


в) Модель Гербера

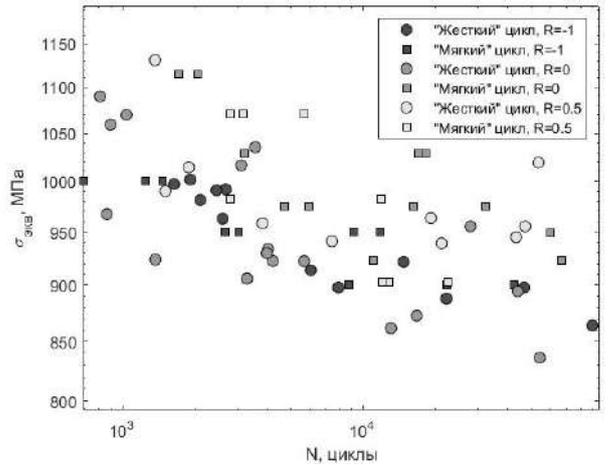


г) Модель Марина

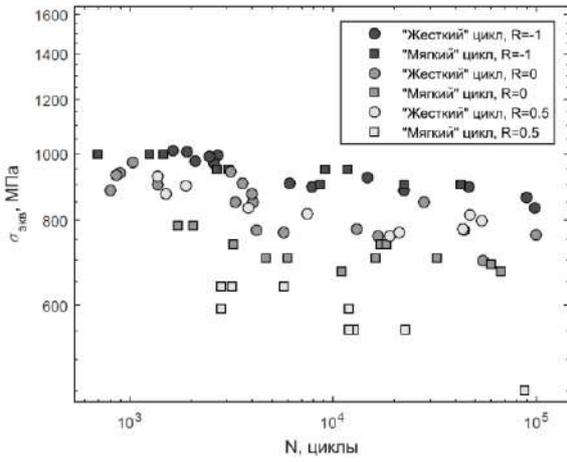
Рисунок 5.8 – Обобщение результатов испытаний ВЖ175 на МЦУ при 20 °С



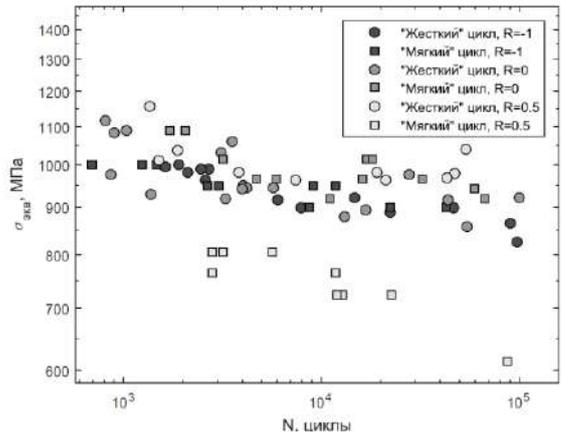
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

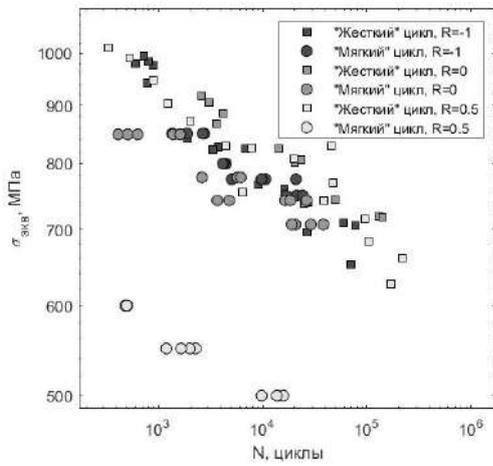


в) Модель Гербера

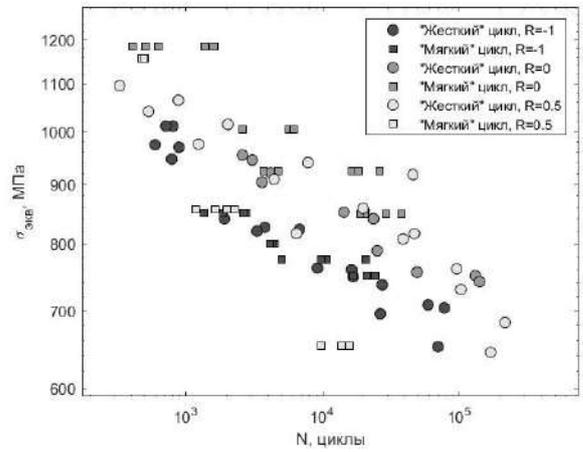


г) Модель Марина

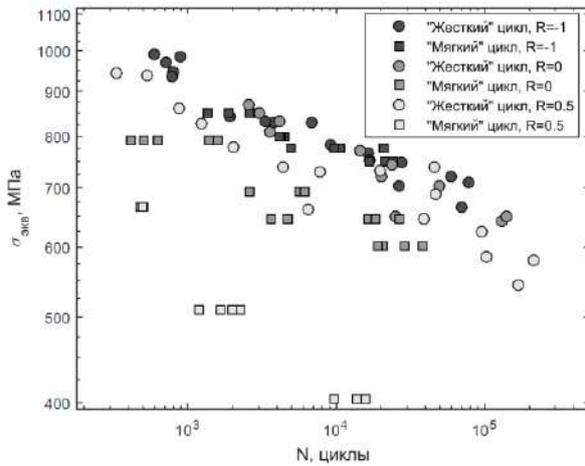
Рисунок 5.9 – Обобщение результатов испытаний ВЖ175 на МЦУ при 650 °С



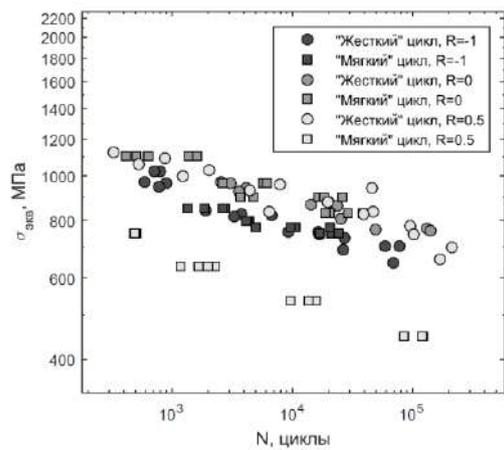
а) Модель Смитта-Уотсона-Топпера



б) Модель Гудмана

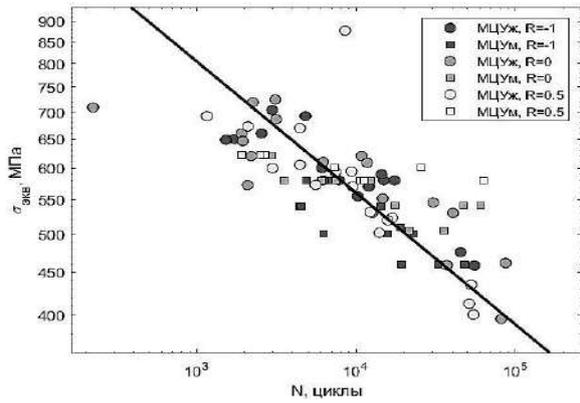


в) Модель Гербера

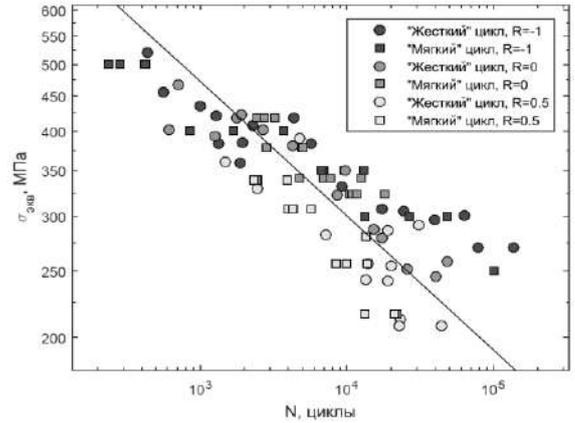


г) Модель Марина

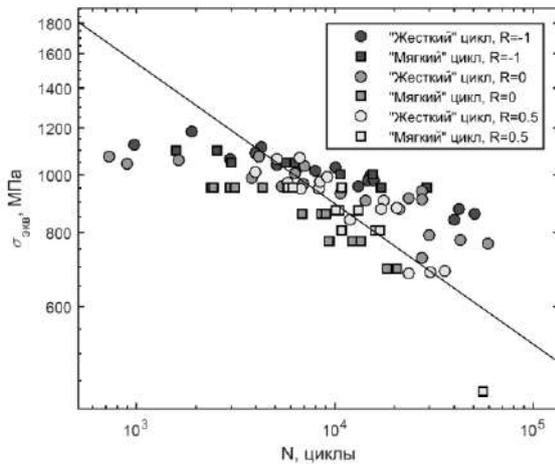
Рисунок 5.10 – Обобщение результатов испытаний ВЖ175 на МЦУ при 750 °С



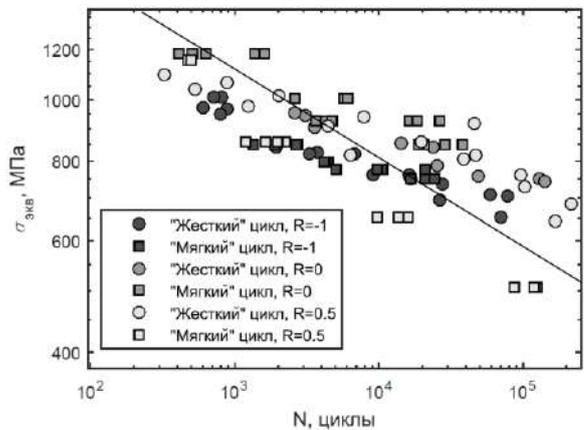
ВКНА-1ВР, 20 °С, модель Гудмана



ВКНА-1ВР, 850 °С, модель Гербера



ВЖ175, 20 °С, Модель Гербера



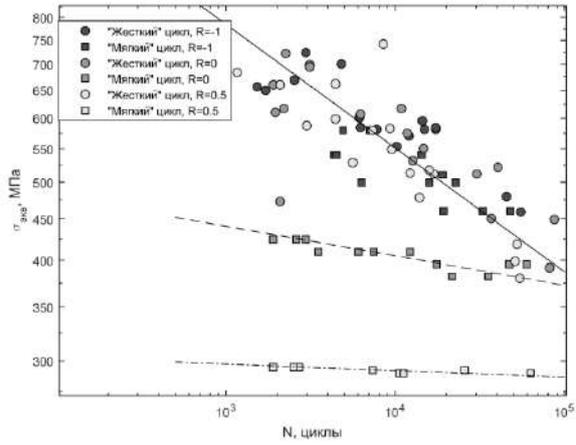
ВЖ175, 750 °С, Модель Гудмана

Рисунок 5.11 – обобщенные кривые усталости при «мягком» и «жестком» нагружении при произвольной асимметрии цикла

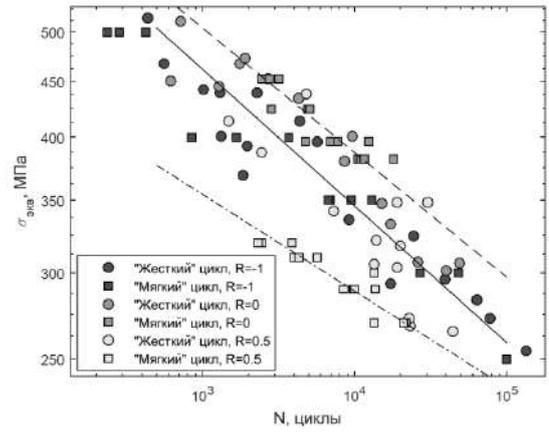
Таблица 5.4. Коэффициенты детерминации R² для обобщенных кривых усталости при «жестком» цикле.

Модель	ВКНА-1Вр			ВЖ175		
	20°С	850°С	1050°С	20°С	650°С	750°С
Смитт-Уотсон-Топпер	0,62	0,88	0,78	0,64	0,63	0,84

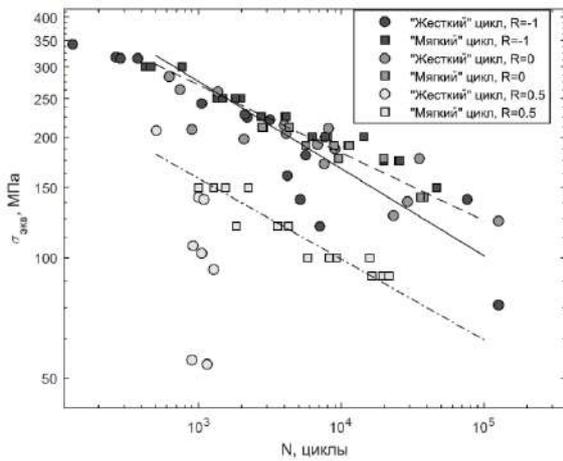
Обнаруженная закономерность может быть полезна при оценке долговечности материалов, схожих с исследованными в настоящей работе. Если провести испытания на малоцикловую усталость при «жестком» нагружении при некотором коэффициенте асимметрии, то можно оценить долговечность при других коэффициентах асимметрии при «жестком» нагружении, а также долговечность при симметричном «мягком» цикле.



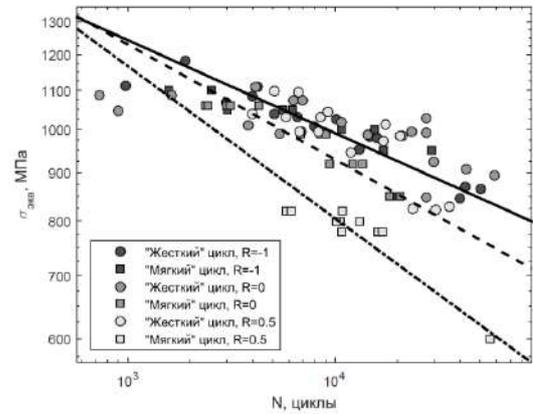
а) ВКНА-1ВР, 20°C



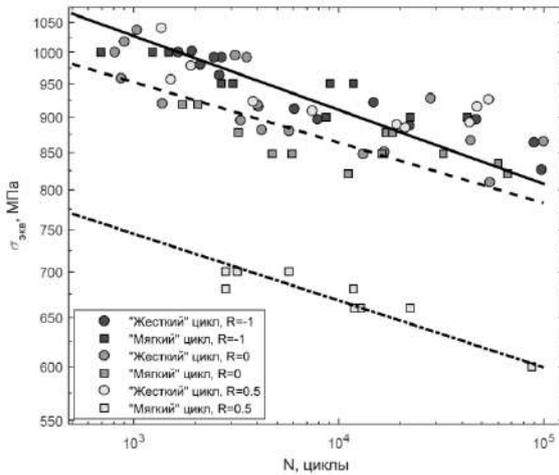
б) ВКНА-1ВР, 850°C



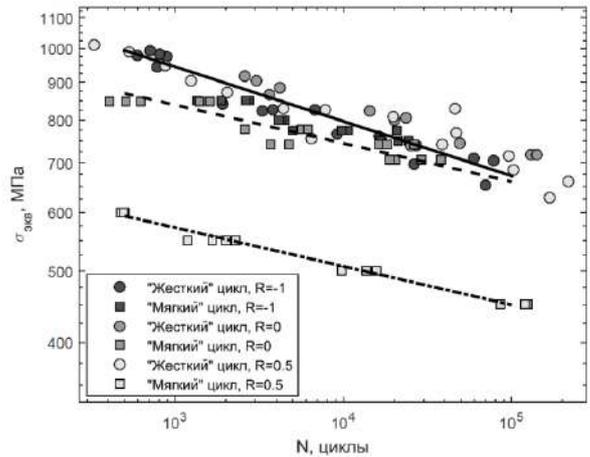
в) ВКНА-1ВР, 1050°C



г) ВЖ175, 20°C



д) ВЖ175, 650°C



е) ВЖ175, 750°C

Рисунок 5.12 – обобщенные кривые усталости по модели Смитта-Уотсона-Топпера. Сплошная линия – линия регрессии для обобщенной выборки «жесткого» цикла при $R_\sigma = -1$, $R_\sigma = 0$, $R_\sigma = 0.5$ и «мягкого» цикла при $R_\sigma = -1$; пунктирная линия – «мягкий» цикл при $R_\sigma = 0$; штрихпунктирная линия – «мягкий» цикл при $R_\sigma = 0.5$

Для «мягкого» же нагружения не найдено моделей с двумя регрессионными параметрами, с помощью которых можно было бы корректно оценить ожидаемую

долговечность при произвольном коэффициенте асимметрии. Был выполнен анализ применимости моделей с тремя регрессионными параметрами и выбор наиболее корректной из них. Поясняющая схема алгоритма выбора наиболее корректной модели представлена на рисунке 5.13:

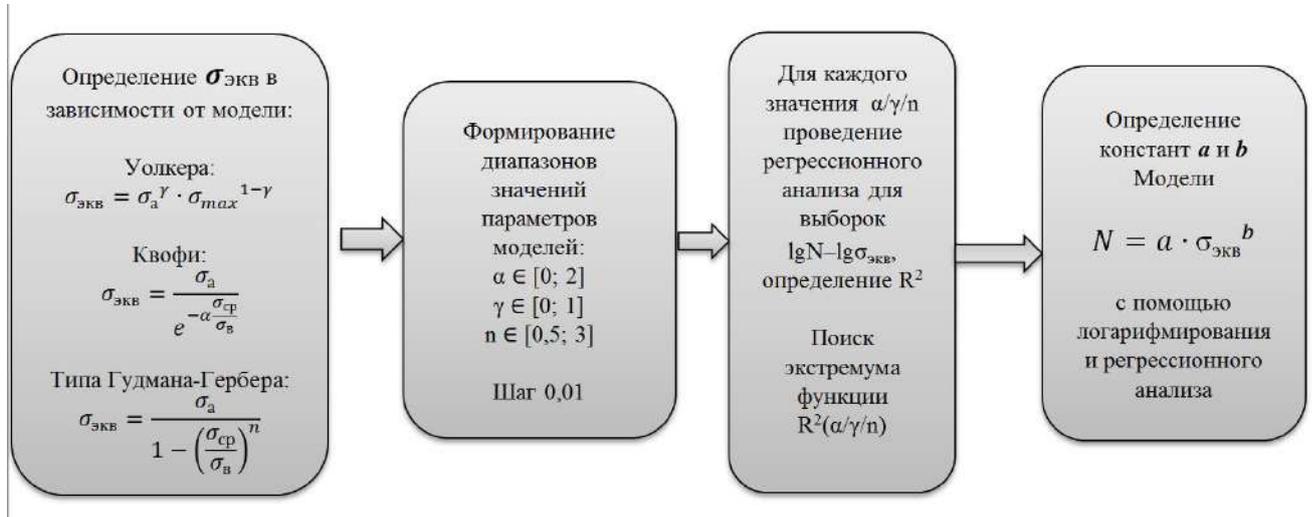
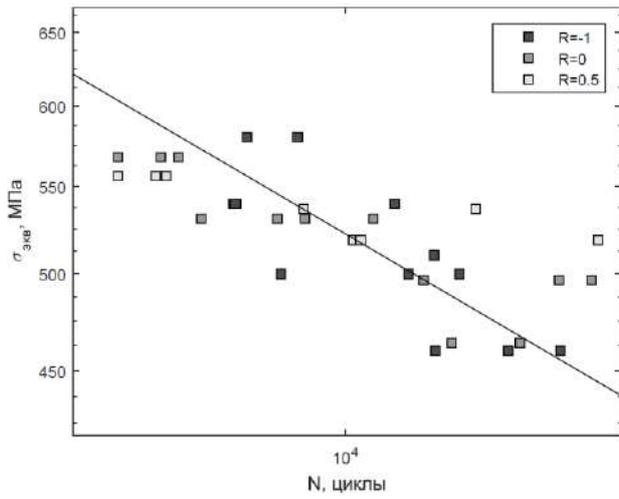


Рисунок 5.13 – алгоритм выбора модели оценки долговечности и определения ее параметров.

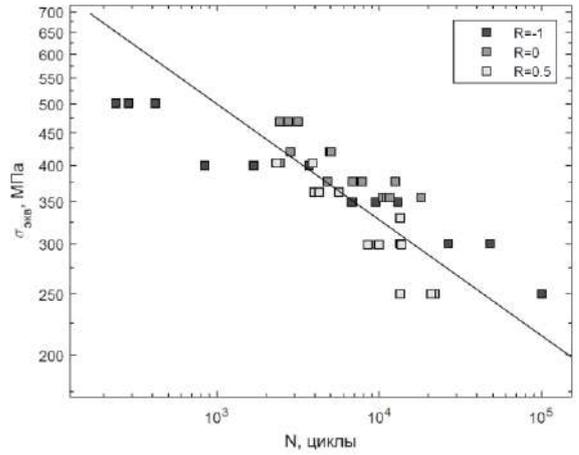
Определено, что для оценки долговечности при произвольной асимметрии «мягкого» цикла нагружения рассматриваемых сплавов лучше всего подходят модели типа Гудмана-Гербера и модель Уокера. Как показано в таблице 5.5, для ВЖ175 при 650 °С и 750°С и ВКНА-1ВР при 20°С и 850°С наибольшего соответствия (наибольшего R^2) удалось достичь с использованием модели типа Гудмана-Гербера, а для ВЖ175 при 20°С и ВКНА-1ВР при 1050 °С - с использованием модели Уокера. Обобщенные кривые усталости, построенные по этим моделям, приведены на рисунке 5.14.

Таблица 5.5. Коэффициенты детерминации R^2 для обобщенных кривых усталости при «мягком» цикле нагружения.

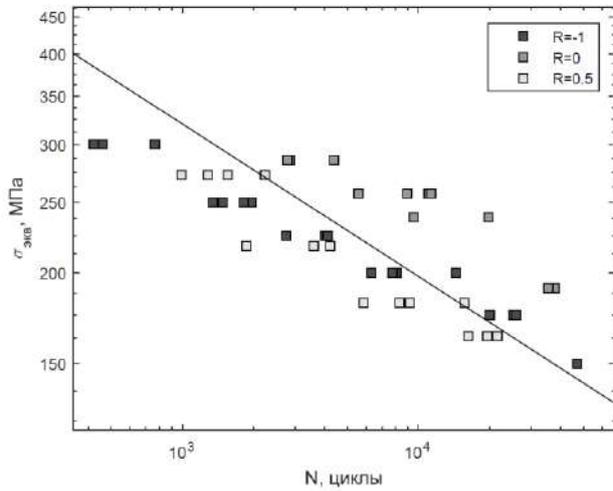
Модель	ВКНА-1ВР			ВЖ175		
	20°С	850°С	1050°С	20°С	650°С	750°С
Уолкер	0,34	0,54	0,59	0,74	0,26	0,44
Квофи	0,13	0,40	0,29	0,63	0,14	0,36
Гудман-Гербер	0,57	0,70	0,28	0,51	0,48	0,62



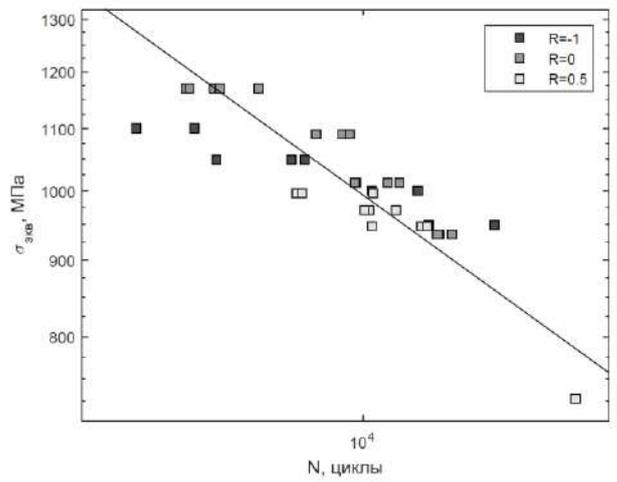
а) ВКНА-1ВР, 20°C. Модель типа Гудмана-Гербера (5.9)



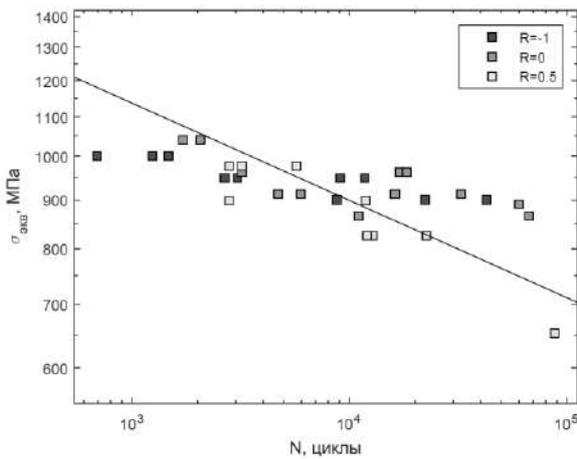
б) ВКНА-1ВР, 850°C. Модель типа Гудмана-Гербера (5.9)



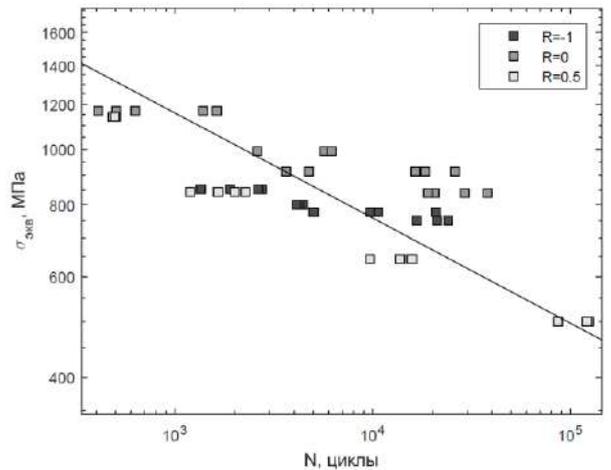
в) ВКНА-1ВР, 1050°C. Модель Уокера (5.8)



г) ВЖ175, 20°C. Модель Уокера (5.8)



д) ВЖ175, 650°C. Модель типа Гудмана-Гербера (5.9)



е) ВЖ175, 750°C. Модель типа Гудмана-Гербера (5.9)

Рисунок 5.14 – обобщенные кривые усталости при «мягком» нагружении

Следует отметить, что коэффициент детерминации R^2 недостаточно точно характеризует применимость исследуемых моделей. Если в исходной выборке, соответствующей одной температуре и одному коэффициенту асимметрии, на некотором уровне нагружения σ_a наблюдается значительный разброс долговечностей, этот разброс будет наблюдаться и на соответствующем уровне эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$. Так как $\sigma_{\text{экв}}$ зависит только от R и σ_a , рассматриваемые модели не могут объяснить или снизить разброс долговечностей исходных выборок. Поэтому также представляет интерес определение относительных коэффициентов детерминации $R^2_{\text{отн}}$, представляющих собой отношение коэффициента детерминации для данных $\lg N - \lg \sigma_{\text{экв}}$ (таблицы 5.4 и 5.5), к средним коэффициентам детерминации исходных выборок (таблица 5.1):

$$R^2_{\text{отн}} = \frac{R^2_{\text{модели}}}{R^2_{\text{сп.}}}$$
 (5.12)

Результаты исследования сведены в единую блок-схему (рисунок 5.15) показывающую, для каких выборок исследованных сплавов какие модели оценки долговечности при произвольном коэффициенте асимметрии являются предпочтительными. Для большей ясности в блок-схеме параметры цикла $\sigma_{\text{ср}}$ и σ_{max} выражены через коэффициент асимметрии R и амплитуду напряжений σ_a . В блок-схеме также приведены регрессионные параметры используемых моделей и относительный коэффициент детерминации $R^2_{\text{отн}}$, определенный по формуле (5.12).

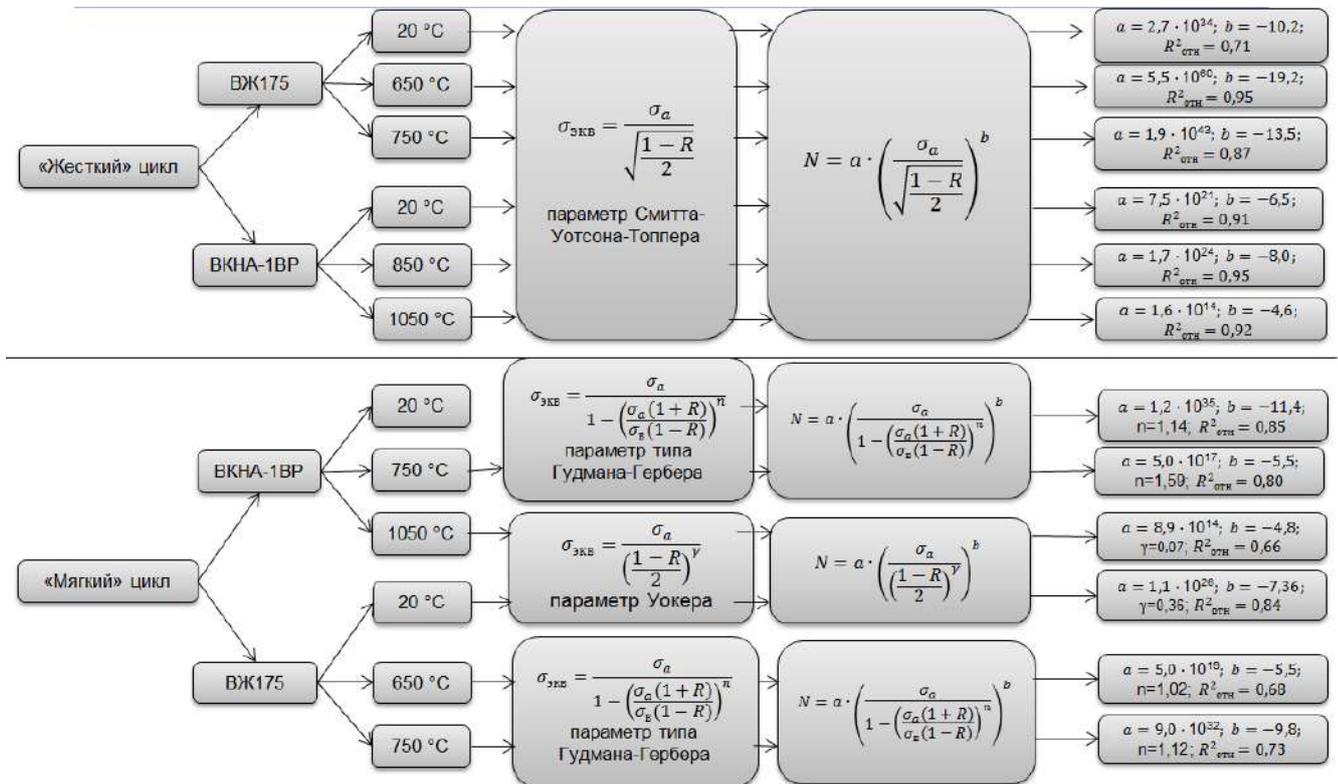


Рисунок 5.15 – алгоритм оценки долговечности образцов из ВЖ175 и ВКНА-1ВР при произвольном коэффициенте асимметрии цикла нагружения

5.3 Заключение по пятой главе

Представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость сплавов ВЖ175 при температурах 20°C, 650°C, 750°C и ВКНА-1ВР при 20°C, 850°C, 1050°C, при разных контролируемых параметрах нагружения (напряжение или деформация) при трех коэффициентах асимметрии цикла ($R=0$; $R=0,5$; $R=-1$). Исследована применимость основанных на силовом подходе моделей оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла при «мягком» и «жестком» нагружении к полученным результатам. Сделаны следующие заключения:

1. Определены границы применимости рассмотренных моделей: в частных случаях с использованием моделей Гербера и Гудмана можно обобщить результаты испытаний, проведенные при всех рассмотренных коэффициентах асимметрии при «мягком» и «жестком» циклах – для ВКНА-1ВР при 20°C и 850°C, ВЖ175 при 20°C и 750°C. Однако ни одна модель не подходит для оценки долговечности на всем диапазоне рассмотренных температур.

2. При «жестком» нагружении для оценки долговечности при произвольном коэффициенте асимметрии корректно использовать модель Смитта-Уотсона-Топпера для сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР при всех исследованных температурах, модель подходит для обобщения выборок результатов испытаний при жестком цикле при всех трех коэффициентах асимметрии. Кроме того, по полученным кривым можно прогнозировать и результаты испытаний при мягком симметричном цикле нагружения.

3. При «мягком» нагружении наиболее корректно проводить оценку долговечности при произвольной асимметрии цикла с использованием модели типа Гудмана-Гербера для образцов из сплава ВЖ175 при 650 °C и 750°C и ВКНА-1ВР при 20°C и 850°C; с использованием модели Уокера – для ВЖ175 при 20°C и ВКНА-1ВР при 1050 °C .

4. Разработан алгоритм оценки долговечности образцов из ВЖ175 при температурах 20, 650 и 750 °C и ВКНА-1ВР при температурах 20, 850 и 1050 °C при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «мягком» и «жестком» нагружении с использованием моделей Гудмана, Гербера, Смита-Уотсона-Топпера, Уолкера и предложенной авторами модели на основе уравнений Гудмана и Гербера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена малоцикловой усталости используемых в авиационной промышленности жаропрочных никелевых сплавов – дискового деформируемого сплава ВЖ175 и лопаточного интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР с равноосной структурой. Проведены испытания на малоцикловую усталость при разных режимах нагружения (при контроле нагрузки с регистрацией деформации, при контроле деформации), разных асимметриях цикла ($R=0$, $R=-1$, $R=0,5$), температурах испытания (20°C , 650°C и 750°C для ВЖ175; 20°C , 850°C и 1050°C для ВКНА-1ВР). После проведения испытаний был выполнен фрактографический анализ испытанных образцов, проведена аналитическая обработка результатов испытаний. Исследована применимость моделей учета асимметрии цикла нагружения. В результате выполненной работы получены следующие основные выводы:

1. Исследовано влияние асимметрии цикла и температуры испытаний на сопротивление малоцикловой усталости ВЖ175 и ВКНА-1ВР. Для обоих сплавов асимметрия цикла при «жестком» нагружении вызывает большее снижение долговечности, чем при «мягком». Повышение температуры от комнатной до рабочей незначительно снижает сопротивление усталости ВЖ175 и более существенно для ВКНА-1ВР.

2. Установлена связь между параметрами нагружения и механизмами разрушения. Повышение температуры испытаний ВЖ175 от комнатной до 750°C , и R от -1 до $0,5$, приводит к изменению строения очага усталостного разрушения от фасеток скола, к смешенному и далее к межзеренному, а зоны усталостного развития трещины от усталостных бороздок, к фасеткам скола, далее к смешенному и межзеренному разрушению. ВКНА-1ВР вне зависимости от условий нагружения разрушается по границам дендритов либо внутризеренно с формированием вязких ямок по матрице и фасеток скола по упрочняющей и карбидной фазам, без образования усталостных бороздок и в некоторых случаях с трудно идентифицируемым очагом усталостного разрушения.

3. Установлена взаимосвязь параметров упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении. При «жестком» оба сплава циклически стабильны, а пластические деформации малы по сравнению с упругими на всем диапазоне долговечностей. При несимметричном мягком нагружении при повышенных температурах у обоих сплавов наблюдается циклическая ползучесть с выраженной стадийностью. При симметричном цикле мягкое и жесткое нагружение почти эквивалентно при всех температурах для обоих сплавов.

4. Разработан алгоритм оценки долговечности ВЖ175 и ВКНА-1ВР при произвольном коэффициенте асимметрии при «мягком» и «жестком» циклах при рассмотренных

температурах с использованием моделей Гудмана, Гербера, Смита-Уотсона-Топпера, Уолкера и предложенной автором модели на основе моделей Гудмана и Гербера.

Дальнейшее развитие темы работы может быть выполнено в следующих направлениях:

- 1) Разработка модели, позволяющей оценить свойства малоциклового усталости не только при произвольной асимметрии цикла, но и при произвольной температуре в некотором диапазоне;
- 2) Исследование применимости энергетического и деформационного подходов для построения обобщенных кривых усталости при произвольной асимметрии цикла;
- 3) Исследование взаимосвязей статической и циклической ползучести;
- 4) Исследования характера изменения структуры жаропрочных никелевых сплавов при малоцикловом нагружении с разными параметрами нагружения;
- 5) Исследование границ применимости экстраполяции полученных в настоящей работе результатов и выводов на другие жаропрочные никелевые сплавы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава // *Авиационные материалы и технологии*. – 2023. – №1(70). – С. 126-136.
2. Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ*. – 2022. – №1(107). – С. 97-110.
3. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // *Труды ВИАМ*. – 2018. – № 9. – С. 51-60.
4. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy during asymmetric loading // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019, – №9, – P. 889-893.
5. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Letnikov M.N. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy at symmetric and asymmetric deformation // *Inorganic materials: applied research*. 2019, – №4, – P. 846-852.
6. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при асимметричном нагружении // *Металлы*. – 2019. – №5. – С. 57-62.
7. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при симметричном и асимметричном деформировании // *Материаловедение*. – 2018. – №1. – С. 3-9.
8. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А., Лукьянова М.И. Исследование малоциклового усталости жаропрочных сплавов при «жестком» цикле нагружения // *Цветные металлы*. – 2017. – № 2. – С. 91-95.
9. Ходинев И.А. Исследование влияния коэффициента асимметрии цикла на малоцикловую усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // *Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»*. – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 9-22.
10. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВКНА 1-ВР / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // *Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»*. – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 41-64.

11. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175/ Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. // Материалы Всероссийской конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства». — М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». — 2021. — С. 99-121.
12. Ходинев И.А. Влияние температуры испытания и асимметрии цикла на МЦУ при заданной деформации жаропрочного сплава ВЖ175 / Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н.// Материалы XI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». — М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». — 2019. — С. 90-106.
13. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. — СПб.: Профессия, 2002. — 320 с.
14. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов. — М.: Наука, 2003. — 254 с.
15. Терентьев В. Ф., Кораблева С. А. Усталость металлов. — М.: Наука, 2015. — 484 с.
16. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. — Киев: Наукова думка, 1987. — Ч. 1. — 347 с.
17. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. — Киев: Наукова думка, 1987. — Ч. 2. — 832 с.
18. Райхер В. Л. Усталостная повреждаемость. — М.: Изд-во МАТИ, 2006. — 238 с.
19. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения / пер. с англ. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
20. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В двух частях. Часть 1. Деформация и разрушение // М.: Машиностроение, 1974. — С. 374–414.
21. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
22. Dowling N. E. Mechanical behavior of materials. — Pearson Education Limited, 2013. — ISBN 0-273-76455-1.
23. Ellyin F. Fatigue damage, crack growth and life prediction. — London: Chapman & Hall, 1997. — 486 с.
24. Терентьев В. Ф., Петухов А. Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. — М.: ИМЕТ РАН–ЦИАМ, 2013. — 515 с.
25. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.

26. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В двух частях. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. — М.: Машиностроение, 1974. — 368 с.
27. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
28. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. В двух книгах. — Рыбинск: ООО "Издательский дом Газотурбинные технологии", 2010–2011. — 605 с.; 493 с.
29. Биргер И. А., Балашов Б. Ф., Дульнев Р. А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1981. — 222 с.
30. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчёт на прочность деталей машин: справочник. — 4-е изд. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.
31. Шанявский А. А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. — Монография. — Уфа, 2003.
32. Ерасов В. С., Яковлев Н. О., Нужный Г. А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № S. — С. 440–448.
33. Петухов А. Н. Соппротивление усталости деталей ГТД. — М.: Машиностроение, 1993. — 240 с.
34. Фридман Я. Б., Гордеева Т. А., Зайцев А. М. Строение и анализ изломов металлов. — М.: Машгиз, 1960. — 128 с.
35. Гордеева Т. А., Жегина И. П. Анализ изломов при оценке надёжности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 200 с.
36. Методические указания. Расчёты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов РД 50-672-88. — М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1989. — 32 с.
37. Физическое металловедение. Т. 1. Атомное строение металлов и сплавов / под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена. — М.: Металлургия, 1987. — 639 с.
38. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № S. — С. 36–52.
39. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». — 2011. — № SP2. — С. 13–19.
40. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М. и др. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № S. — С. 52–57.

41. Махутов Н. А. Малоцикловая усталость // *Машиностроение. Энциклопедия. Т. II-I. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов.* — М.: Машиностроение, 2010. — С. 217–285.
42. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // *Авиационные материалы и технологии.* — 2020. — № 4 (61). — С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
43. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина. Методики испытаний и обработки данных // *Авиационные материалы и технологии.* — 2021. — № 1 (62). — С. 80–94. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
44. Орешко Е. И., Ерасов В. С., Луценко А. Н., Терентьев В. Ф., Слизов А. К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве σ – ε – t // *Авиационные материалы и технологии.* — 2017. — № 1 (46). — С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
45. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О. Механические свойства материалов в расчетах малоциклового деформирования конструкций // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2022. — Т. 88, № 6. — С. 52–59. DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59.
46. Трощенко В. Т., Хамаза Л. А. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы // *Проблемы прочности.* — 2010. — № 6. — С. 26–43.
47. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. — М.: Стандартинформ, 1988. — 132 с.
48. ASTM E468-18 Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials. — American Society for Testing and Materials, 2019. — 6 p.
49. Беляев М. С., Горбовец М. А. О разрыве кривой малоцикловой усталости жаропрочного никелевого сплава // *Авиационные материалы и технологии.* — 2014. — № S4. — С. 103–108.
50. Беляев М. С., Терентьев В. Ф., Горбовец М. А. и др. Малоцикловая усталость при заданной деформации и параметры упругопластического деформирования жаропрочного сплава ВЖ175 // *Авиационные материалы и технологии.* — 2014. — № S4. — С. 87–92.
51. Поварова К. Б., Базылева О. А., Горбовец М. А. и др. Изучение влияния температуры на характеристики малоцикловой усталости монокристаллов интерметаллидного сплава на основе Ni3Al, содержащего рений // *Металлы.* — 2019. — № 4. — С. 33–40.
52. Петрушин Н. В., Горбовец М. А., Ходинев И. А. Малоцикловая усталость жаропрочного никелевого сплава ЖС32, полученного методами направленной кристаллизации и селективного

- лазерного сплавления на монокристаллической подложке // *Металловедение и термическая обработка металлов.* — 2019. — № 11(773). — С. 25–31.
53. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Монин С. А., Степанов Д. Б. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного монокристаллического сплава на основе никеля // *Вестник машиностроения.* — 2022. — № 6. — С. 44–50. DOI 10.36652/0042-4633-2022-6-44-50.
54. Рыжков П. В., Горбовец М. А., Ходинев И. А. Определение параметров модели пластичности при циклическом нагружении жаропрочного никелевого сплава при повышенной температуре // *Авиационные материалы и технологии.* — 2025. — № 1(78). — С. 72–87. DOI 10.18577/2713-0193-2025-0-1-72-87.
55. Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Петрушин Н. В., Черкасова С. А., Волков М. Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // *Деформация и разрушение материалов.* — 2009. — № 8. — С. 41–48.
56. Беляев М. С., Горбовец М. А., Бакрадзе М. М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* — 2015. — № 12. — Ст. 4. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.05.2021). DOI 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4
57. Гаденин М. М. Расчетно-экспериментальный анализ сопротивления малоцикловому деформированию жаропрочного сплава // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2022. — Т. 88, № 9. — С. 61–68. DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-9-61-68.
58. Голубовский Е. Р., Волков М. Е., Эммаусский Н. М., Шibaев С. А. Экспериментальное исследование малоциклового усталости монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5 при высоких температурах // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.* — 2015. — Т. 19, № 3(69). — С. 119–125.
59. Li S., Wang R.-Z., Li K.-S., Zhang X.-C., Tu S.-T. Determination of relationship between high-temperature low cycle fatigue damage and mechanical property degradation: Experimental and theoretical analyses // *International Journal of Fatigue.* — 2023. — Vol. 175. — Article 107771.
60. Liu L. L., Hu D. Y., Li D., Hu R. G., Gu Y. X., Wang R. Q. Effect of Grain Size on Low Cycle Fatigue Life in Compressor Disc Superalloy GH4169 at 600 °C // *Procedia Structural Integrity.* — 2017. — Vol. 7. — P. 174–181.
61. Dinesh K., Dash B. B., Kannan R., Paulose N., Reddy G. V. P., Krishnaswamy H., Sankaran S. Effect of temperature on fatigue behavior and deformation mechanisms of nickel-based superalloy SU-263 // *International Journal of Fatigue.* — 2025. — Vol. 192. — Article 108721.
62. Bartošák M., Mára V., Šulák I. Effects of temperature and strain rate on isothermal low-cycle fatigue behaviour of Inconel 718 superalloy: Damage mechanisms, microstructure evolution, and life prediction // *International Journal of Fatigue.* — 2025. — Vol. 198. — Article 109005.

63. Li J., Jin X., Li D., Yang J., Fan X. High temperature fatigue behavior of coated and uncoated nickel-based single crystal superalloy DD6: Microstructures evolution, damage mechanisms and lifetime prediction // *International Journal of Fatigue*. — 2025. — Vol. 190. — Article 108670.
64. Liu M., Wang Q., Jiang Y., Zou T., Wu H., Gao Z., Pei Y., Zhang H., Liu Y., Wang Q. Low cycle fatigue behavior of MAR-M247 nickel-based superalloy from 500 to 900 °C: Analysis of cyclic response, microstructure evolution and failure mechanism // *International Journal of Fatigue*. — 2024. — Vol. 189. — Article 108564.
65. Huo S., Dai Y., Wang X., Tan Z., Liang Z., Liu Y., Li Y., Tao X., Tao Y., Zhang C., Zhang S., Li J., Zhou Y., Sun X. Low cycle fatigue behaviors and deformation mechanisms of the oriented fourth-generation Nickel-based single crystal superalloy at 1000 °C // *Intermetallics*. — 2025. — Vol. 183. — Article 108808.
66. He S., Li L., Zhao Y., An W., Lu F., Zhang J., Lu S., Cormier J., Feng Q. Low-cycle fatigue behavior of a solution-treated and HIPped nickel-based single-crystal superalloy at 760 °C // *Materials Science and Engineering: A*. — 2023. — Vol. 881. — Article 145369.
67. Sun C., Li W., Li C., Sun R., Liu G., Li X. Study on Microstructure and Fatigue Properties of Laser Powder Bed Fusion Nickel-Based Superalloy with Heat Treatment // *Additive Manufacturing Frontiers*. — 2025. — Vol. 4, Issue 2. — Article 200217.
68. Tian Q., Qin H.-Y., He J., Guan X. The effect of grain size and anomalous shape on low cycle fatigue of nickel-based superalloy at elevated temperature // *International Journal of Fatigue*. — 2024. — Vol. 188. — Article 108526.
69. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. — М.: Машиностроение, 2007. — 204 с.
70. Goodman J. *Mechanics applied to engineering*. — London: Longmans, Green and Co, 1919. — 854 p.
71. Gerber W. Bestimmung der zulossigen in eisen constructions // *Z. Bayer Arch. Ing. Ver.* — 1874. — Vol. 6. — P. 101–110.
72. Soderberg C. R. Factors of safety and working stresses // *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. — 1939. — № 52. — P. 13–28.
73. Smith K. N., Watson P., Topper T. H. A stress-strain function for the fatigue of metals // *Journal of Materials*. — 1970. — Vol. 5, № 4. — P. 767–778.
74. Ince A., Glinka G. A modification of Morrow and Smith–Watson–Topper mean stress correction models // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. — 2011. — Vol. 34. — P. 854–867.
75. Kwofie S. An exponential stress function for predicting fatigue strength and life due to mean stresses // *International Journal of Fatigue*. — 2001. — № 23(9). — P. 829–836.
76. Marin J. Interpretation of fatigue strengths for combined stresses // *Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals*. — 1956. — P. 184–195.

77. Walker E. K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum // *Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life* / Ed. M. Rosenfeld. West Conshohocken: ASTM International, 1970. — ASTM STP 462. — P. 1–14.
78. Васильев Б. Е., Плещеев И. И., Шибяев С. А., Колотников М. Е. Прогнозирование циклической долговечности дисков ГТД из сплава ЭИ698-ВД с учетом асимметрии цикла нагружения // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. — 2020. — Т. 24, № 2(88). — С. 3–12.
79. Серветник А. Н. Вариант модели Уокера для построения кривой малоциклового усталости с асимметрией жесткого цикла нагружения // *Авиационные двигатели*. — 2021. — № 1(10). — С. 39–46. DOI 10.54349/26586061_2021_1_39.
80. Chen W., Spätig P., Seifert H. P. Role of mean stress on fatigue behavior of a 316L austenitic stainless steel in LWR and air environments // *International Journal of Fatigue*. — 2021. — Vol. 145. — Article 106111.
81. Kamaya M., Kawakubo M. Mean stress effect on fatigue strength of stainless steel // *International Journal of Fatigue*. — 2015. — Vol. 74. — P. 20–29.
82. Lim C.-B., Kim K. S., Seong J. B. Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress // *International Journal of Fatigue*. — 2009. — Vol. 31, Issue 3. — P. 501–507.
83. Yuan X., Yu W., Fu S., Yu D., Chen X. Effect of mean stress and ratcheting strain on the low cycle fatigue behavior of a wrought 316LN stainless steel // *Materials Science and Engineering: A*. — 2016. — Vol. 677. — P. 193–202.
84. Hao H., Ye D., Chen Y., Feng M., Liu J. A study on the mean stress relaxation behavior of 2124-T851 aluminum alloy during low-cycle fatigue at different strain ratios // *Materials & Design*. — 2015. — Vol. 67. — P. 272–279.
85. Benedetti M., Berto F., Le Bone L., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components // *International Journal of Fatigue*. — 2020. — Vol. 133. — Article 105397.
86. Gao F., Xie L., Liu T., Song B., Pang S., Wang X. An equivalent strain energy density model for fatigue life prediction under large compressive mean stress // *International Journal of Fatigue*. — 2023. — Vol. 177. — Article 107899.
87. Mahtabi M. J., Shamsaei N. A modified energy-based approach for fatigue life prediction of superelastic NiTi in presence of tensile mean strain and stress // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2016. — Vol. 117. — P. 321–333.

88. Paul S. K., Stanford N., Taylor A., Hilditch T. The effect of low cycle fatigue, ratcheting and mean stress relaxation on stress–strain response and microstructural development in a dual phase steel // *International Journal of Fatigue*. — 2015. — Vol. 80. — P. 341–348.
89. Ерасов В. С., Нужный Г. А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // *Авиационные материалы и технологии*. — 2011. — № 4. — С. 35–40.
90. Ерасов В. С., Автаев В. В., Орешко Е. И., Яковлев Н. О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* — 2018. — № 9 (69). — С. 92–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (25.06.2020). DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
91. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. — М.: Стандартинформ, 2005. — 50 с.
92. ASTM E606/E606M-19 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. — American Society for Testing and Materials, 2018. — 16 p.
93. ASTM E466-15 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. — American Society for Testing and Materials, 2015. — 6 p.
94. ISO 12106:2017 Metallic materials – Fatigue testing – Axial-strain-controlled method. — 38 p.
95. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2013. — С. 32–33.
96. Zhang H., Wang Q., Gong X. и др. Comparisons of low cycle fatigue response, damage mechanism, and life prediction of MarBN steel under stress and strain-controlled modes // *International Journal of Fatigue*. — 2021. — Vol. 149. — Article 106291. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106291.
97. Chang L., Zhou B.-B., Ma T.-H., Li J., He X.-H., Zhou C.-Y. Comparisons of low cycle fatigue behavior of CP-Ti under stress and strain-controlled modes in transverse direction // *Materials Science & Engineering: A*. — 2019. — Vol. 746. — P. 27–40. DOI: 10.1016/msea.2018.12.125.
98. Chang L., Zhou B.-B., Ma T.-H., Li J., He X.-H., Zhou C.-Y. The difference in low cycle fatigue behavior of CP-Ti under fully reversed strain and stress controlled modes along rolling direction // *Materials Science & Engineering*. — 2019. — Vol. 742. — P. 211–223. DOI: 10.1016/msea.2018.11.003.
99. Wu D.-L., Zhao P., Wang Q.-Q., Xuan F.-Z. Cyclic behavior of 9–12% Cr steel under different control modes in low cycle regime: A comparative study // *International Journal of Fatigue*. — 2015. — Vol. 70. — P. 114–122. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.006.
100. Zhao P., Xuan F.-Z., Wu D.-L. Cyclic softening behaviors of modified 9–12% Cr steel under different loading modes: Role of loading levels // *International Journal of Mechanical Science*. — 2017. — Vol. 131–132. — P. 278–285. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.07.001.

101. Ahlström J., Karlsson B. Fatigue behaviour of rail steel—a comparison between strain and stress controlled loading // *Wear*. — 2005. — Vol. 258, Issues 7–8. — P. 1187–1193.
102. Hasegawa S., Tsuchida Y., Yano H., Matsui M. Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy // *International Journal of Fatigue*. — 2007. — Vol. 29, Issues 9–11. — P. 1839–1845.
103. Shiozawa K., Kitajima J., Kaminashi T., Murai T., Takahashi T. Low-Cycle Fatigue Deformation Behavior and Evaluation of Fatigue Life on Extruded Magnesium Alloys // *Procedia Engineering*. — 2011. — Vol. 10. — P. 1244–1249.
104. Yin S. M., Yang H. J., Li S. X., Wu S. D., Yang F. Cyclic deformation behavior of as-extruded Mg–3%Al–1%Zn // *Scripta Materialia*. — 2008. — Vol. 58, Issue 9. — P. 751–754.
105. Reddy G. V. P., Dinesh P. M., Sandhya R., Laha K., Jayakumar T. Behavior of 321 stainless steel under engineering stress and strain controlled fatigue // *International Journal of Fatigue*. — 2016. — Vol. 92, Part 1. — P. 272–280.
106. Paul S. K., Sivaprasad S., Dhar S., Tarafder S. Cyclic plastic deformation and cyclic hardening/softening behavior in 304LN stainless steel // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. — 2010. — Vol. 54, Issue 1. — P. 63–70.
107. Yuan X., Yu W., Fu S., Yu D., Chen X. Effect of mean stress and ratcheting strain on the low cycle fatigue behavior of a wrought 316LN stainless steel // *Materials Science and Engineering: A*. — 2016. — Vol. 677. — P. 193–202.
108. Sun Y., Chen F., Qian S., Chang H., Zhang W., Feng L., Zhou L. Low cycle fatigue behavior and deformation mechanism of Ti–6Al–4V–0.55Fe alloy under the control of strain and stress amplitudes // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2024. — Vol. 33. — P. 5951–5961.
109. Аргинбаева Э. Г., Базылева О. А., Оспенникова О. Г., Летникова Е. Ю., Шестаков А. В. Интерметаллидные никелевые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей // *Вестник Российского Фонда Фундаментальных Исследований*. — 2017. — № 4 (96). — С. 107–114.
110. Лукин В. И., Базылева О. А., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Исследование свойств отливок из интерметаллидного сплава ВКНА-1Вр после исправления дефектов методом сварки // *Сварочное производство*. — 2014. — № 10. — С. 5–12.
111. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Шестаков А. В. Жаропрочные интерметаллидные никелевые сплавы для двигателей летательных аппаратов // *Идеи и Инновации*. — 2020. — № 3–4. — С. 138–146.
112. Унчикова М. В., Костенко Ю. В., Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Исследование влияния высокотемпературной термической обработки на фазовый и химический состав сплава ВКНА-1В // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. — 2015. — № 6. — С. 63–70.

113. Лукин В. И., Базылева О. А., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Исследование свойств отливок из интерметаллидного сплава ВКНА-1Вр после исправления дефектов методом сварки // Сварочное производство. — 2014. — № 10. — С. 5–12.
114. Ломберг Б. С., Шестакова А. А., Летников М. Н., Бакрадзе М. М. Влияние температуры и напряжений на характер наночастиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД // Жаропрочные стали и сплавы. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. — 2019. — № 12 (84). — Ст. 3–10. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.
115. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., Мазалов И. С. Высокотемпературные жаропрочные сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № S. — С. 52–57.
116. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., Мазалов И. С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. — 2011. — № S2. — С. 98–103.
117. Каблов Е. Н., Летников М. Н., Оспенникова О. Г. и др. Особенности формирования частиц упрочняющей γ' -фазы в процессе старения высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ. — 2019. — № 9(81). — С. 3–14. DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14.
118. Степнов М. Н., Шаврин А. В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. — М.: Машиностроение, 2005. — 400 с.
119. Агамиров Л. В. Методы статистического анализа механических испытаний. Справочник. — М.: Интернет Инжиниринг, 2004. — 128 с.
120. Вейбул В. Усталостные испытания и анализ их результатов. — М.: Машиностроение, 1964. — 275 с.
121. Беляев М. С., Хвацкий К. К., Горбовец М. А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // Труды ВИАМ. — 2014. — № 9 (11). — Ст. 11. DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
122. Терентьев В.Ф., Беляев М.С., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Разрушение жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях жесткого малоциклового нагружения / Труды ВИАМ. 2014. № 11. С. 12.
123. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. — 2017. — № 10 (58). — Ст. 11. DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.