

В диссертационный совет 31.1.002.01 при
НИИ «Курчатовский институт» - ВИАМ,
По адресу: 105005, г. Москва,
ул. Радио, д. 17

ОТЗЫВ

*на автореферат диссертационной работы Неруша Святослава Васильевича
«ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
СПЛАВЛЕНИЯ: особенности химического состава, структуры, механических и
прочностных характеристик», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.6.17 «Материаловедение»*

Противоречие между жаропрочностью и технологичностью послойного синтеза известно с первых работ по аддитивному изготовлению никелевых сплавов и до последнего времени удовлетворительного решения не имело. Повышение объёмной доли γ' -фазы, без которого не обойтись при рабочих температурах 900–1000 °С, одновременно переводит сплав в разряд нетехнологичных. Рассматриваемая работа направлена на разрешение этого противоречия. В качестве прикладного применения обозначены рабочие лопатки и сопловые аппараты турбины низкого давления двигателя ПД-26.

В работе сделан переход от простой адаптации существующих жаропрочных никелевых сплавов к направленному проектированию систем легирования с учётом особенностей процесса СЛС. Инструментом послужил обобщённый критерий трещиностойкости Ξ , введённый как отношение функционалов пластической релаксации и накопления дефектов. Полезной особенностью считаю выполненный для критерия глобальный анализ чувствительности. Из двенадцати параметров модели два - температура сольвуса γ' -фазы и характерное время её зарождения - дают 47 % дисперсии, и отсюда следуют направления модификации состава, вплоть до конкретного решения о частичной замене титана ниобием. Экспериментальная проверка модели проведена корректно. После синтеза сплав ВЖС1 представляет собой пересыщенный γ -твёрдый раствор без выделений упрочняющей фазы. Сверхструктурные отражения L_{12} на электронограммах отсутствуют, карты распределения Al и Ti при STEM/EDS-картировании пространственно не коррелируют. Тем самым кинетический блок модели проверен напрямую. Целевая двухфазная структура формируется на стадии термической обработки, причём главной стадией оказывается рекристаллизационный отжиг выше температуры сольвуса, который снимает столбчатую текстуру $\langle 001 \rangle \parallel Z$ и даёт равноосное зерно 40-100 мкм с развитой сетью когерентных двойниковых границ $\Sigma 3$. Роль последних в сопротивлении зернограничному проскальзыванию при ползучести отмечена справедливо.

Кинетика ползучести изучена в интервале 850-950 °С. После нормировки минимальной скорости деформации на коэффициент самодиффузии никеля наклон степенной зависимости остаётся одинаковым при всех температурах, а сохраняющееся расслоение кривых отвечает избыточному энергетическому барьеру около 330 кДж/моль. Это наглядное доказательство того, что процесс контролируется преодолением когерентных барьеров γ/γ' -структуры. Для синтезированного материала полученная величина превышает известную для литого IN738LC.

В разделе, посвящённом сплаву ВЖС3 решена обратная задача проектирования. Показано, что область составов, одновременно удовлетворяющих условию $\Xi > \Xi_{кр}$,

ограничению по числу электронных вакансий и требованию по равновесной доле упрочняющей фазы не ниже 55 %, не содержит ни одного промышленного сплава. Состав получен вне поля известных решений - с высоким отношением Al/Ti, танталом вместо значительной части титана и рением как замедлителем объёмной диффузии. Бездефектный синтез поликристаллического материала с долей γ' -фазы около 60 % без подогрева подложки выше 200 °С при $\sigma_{100} \approx 130$ МПа на 1000 °С следует признать самостоятельным результатом.

Из сплава ВЖС1 синтезирована моноблочная заготовка крыльчатки турбины - деталь, сочетающая массивную ступицу с тонкостенным лопаточным венцом. После стендовых испытаний в составе малоразмерного газотурбинного двигателя капиллярный контроль, цифровая радиография и лазерное 3D-сканирование не выявили дефектов или деформаций. Выпущены технологические рекомендации на параметры синтеза и режимы термической обработки.

По автореферату есть один вопрос:

1. Показатель степени по напряжению $n = 6,24$ приведён как свидетельство дислокационного механизма ползучести. Для дисперсионно-упрочнённых систем такое значение принято рассматривать как кажущееся, завышенное вкладом порогового напряжения, ниже которого макроскопическая ползучесть подавлена. Хотелось бы услышать оценку этого порога для сплава ВЖС1 и отвечающее ему значение истинного показателя - это уточнило бы физическую интерпретацию и границы применимости приведённого конститутивного уравнения.

Вопрос носит уточняющий характер положительной оценки работы не меняет.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, значимые для материаловедения жаропрочных никелевых сплавов и для аддитивного производства ответственных деталей газотурбинных двигателей. Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Неруш Святослав Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Кандидат технических наук,
доцент



Борисов Евгений Владиславович
«09» сентября 2026 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Телефон: 8(800)775-05-30

Адрес электронной почты: evgenii.v.borisov@gmail.com

На обработку персональных данных, размещение этих сведений и отзыва на официальном сайте даю свое согласие.

Подпись удостоверяю



Подпись Борисов Е.В.
УДОСТОВЕРЯЮ
Уполномоченный специалист
кадрам Смирнов
«10» 09 2026.