

В диссертационный совет 31.1.002.01 при
НИЦ «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»

Диссертационная работа Неруша С.В. посвящена решению актуальной научно-технической задачи – установлению особенностей химического состава, структуры и прочностных характеристик и разработке новых жаропрочных никелевых сплавов с объемной долей γ' -фазы 35-40 % (сплав ВЖС1) и 63-67 % (сплав ВЖС3), предназначенных для изготовления методом селективного лазерного сплавления (СЛС) рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления перспективных газотурбинных двигателей, работоспособных при температурах 800-1000 °С.

В рамках выполнения работы автором проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников в области никелевых жаропрочных сплавов и аддитивных технологий их получения, на основании которого обоснована принципиальная несовместимость литейных сплавов с условиями быстрой кристаллизации при СЛС и показана необходимость разработки нового класса сплавов, спроектированных с учетом особенностей формирования структуры непосредственно в процессе синтеза.

Автором предложен обобщенный критерий трещиностойкости Ξ , объединяющий в едином безразмерном функционале три механизма растрескивания синтезированного материала с учетом химического состава и кинетики выделения γ' -фазы – кристаллизационные (горячие), холодные и ликвационные трещины. Критерий апробирован на выборке из 15 никелевых сплавов, применяемых в аддитивных технологиях, коэффициент детерминации R^2 составил 0,94, что подтверждает его применимость для оптимизации химического состава и направленной разработки новых жаропрочных никелевых сплавов с объемной долей γ' -фазы 35–40 % и 63–67 %, не склонных к образованию трещин при СЛС.

На основе предложенного критерия создан новый жаропрочный никелевый сплав марки ВЖС1 с рабочей температурой до 900°С ($\sigma_B = 1446$ МПа, $\sigma_{0,2} = 959$ МПа, $\delta = 19,3\%$ при 20°С; $\sigma_B = 504$ МПа, $\sigma_{0,2} = 469$ МПа, $\delta = 9,7\%$, $\sigma_{100}^{800} = 420$ МПа при 900°С), превосходящий по уровню свойств отечественные жаропрочные сплавы, применяемые в технологии СЛС, на который подана заявка на изобретение. Также создан высоколегированный сплав марки ВЖС3 с объемной долей γ' -фазы 63-67 % и рабочей температурой

до 1000 °С, не имеющий прямых аналогов для данной технологии, на который получен патент на изобретение RU 2865727.

Сопоставление длительной прочности разработанных сплавов с промышленными аналогами по диаграммам Ларсона–Миллера показало, что сплав ВЖС1 после полной термической обработки не уступает литым сплавам IN939 и IN713LC и превосходит синтезированные материалы ЭП648-ПС и ВЖ159-ПС, а сплав ВЖС3 превосходит по длительной прочности литой сплав IN738LC, сопоставим с литым сплавом ВЖЛ12У и несколько уступает литому сплаву CM247LC, что является значимым достижением для материалов, синтезированных методом СЛС.

Установлен эффект подавления зародышеобразования избыточной γ' -фазы в пересыщенной метастабильной субструктуре сплава ВЖС1, обусловленный высокими скоростями кристаллизации микрообъемов ванны расплава, а также формирование двойников отжига в рекристаллизованных зернах синтезированного сплава ВЖС1 после полной термической обработки. Определены значения степенного показателя напряжения $n = 6,24$ и эффективной энергии активации ползучести $Q_c \approx 613$ кДж/моль, свидетельствующие о доминирующем дислокационном механизме ползучести с вкладом γ' -фазы и карбидов в упрочнение.

Установлено бимодальное распределение γ' -фазы в синтезированных сплавах ВЖС1 и ВЖС3 после полной термической обработки, обеспечивающее высокий уровень механических свойств во всем интервале рабочих температур, при этом показано различие морфологии частиц γ' -фазы (округлая для ВЖС1, кубоидная для ВЖС3), связанное с более высоким содержанием γ' -образующих элементов и различными значениями мисфита.

Практическая значимость работы подтверждается разработкой технологических рекомендаций на режимы селективного лазерного сплавления, газостатической и термической обработки сплавов ВЖС1 и ВЖС3, проведением огневых стендовых испытаний крыльчатки турбины малоразмерного газотурбинного двигателя из сплава ВЖС1 с последующим комплексным неразрушающим контролем (люминесцентная дефектоскопия, цифровая радиография, лазерное 3D-сканирование), подтвердившим отсутствие дефектов размером более 130 мкм по всему объему детали, а также положительным заключением АО «ОДК-Авиадвигатель» о применении разработанного сплава для изготовления рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления двигателя ПД-26.

В качестве замечаний к работе можно отметить следующее:

1. В автореферате при описании обобщенного критерия трещиностойкости Ξ не приведены количественные значения коэффициентов веса параметров, входящих в этот критерий, и не указан метод их определения.

2. Несмотря на приведенные в автореферате диапазоны параметра Ларсона–Миллера, при которых кривая длительной прочности сплава ВЖС3 приближается к уровню литого сплава CM247LC, количественные значения расхождения по напряжению или ресурсу между материалами не приведены, что затрудняет точную оценку степени приближения синтезированного материала к литому аналогу.

Данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей научной и практической значимости диссертационной работы.

Диссертация Неруша С.В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая выполнена на высоком научном уровне с использованием современных методов испытаний и имеет существенное значение для авиационной промышленности. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. к кандидатским диссертациям, а ее автор Неруш Святослав Васильевич заслуживает присвоения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение».

Главный металлург
Филиала ПАО «ОДК - Сатурн» - ОМКБ
к.т.н., научная специальность
05.16.01 «Материаловедение и
термическая обработка металлов»



18.08.2026г.,

Е. Г. Лаврик

Подпись главного металлурга филиала ПАО «ОДК - Сатурн» - ОМКБ
к.т.н. Лаврика Евгения Геннадьевича подтверждаю:

Главный инженер
Филиала ПАО «ОДК - Сатурн» - ОМКБ



Р.В. Гаврюшкин

Я, Лаврик Евгений Геннадьевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Главный металлург
Филиала ПАО «ОДК-Сатурн» - ОМКБ



Е.Г. Лаврик

Контактные данные: Филиал ПАО «ОДК - Сатурн» - ОМКБ
644021, г. Омск, ул. Окружная дорога, 3
omkb@omkb.uec-saturn.ru , тел. + 7(3812) 36-07-04