

Научная статья

УДК 620.165.79

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-13-22

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ХН62ВМЮТ-ВД

Л.В. Морозова¹, В.Б. Григоренко², А.М. Терехин²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Производственный комплекс «Салют» акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия; info@uecrus.com

Аннотация. Исследованы причины растрескивания материала деталей сложной конфигурации, изготовленных из жаропрочного и жаростойкого свариваемого сплава на никелевой основе ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708), после проведения сварки. Для выявления причин растрескивания проведены механические испытания образцов из заготовок разных плавок, выполнены металлографические исследования заготовок и готовых деталей. Проведен фрактографический анализ поверхности вскрытых трещин. Исследована величина зерна в различных зонах заготовки. Даны рекомендации по предотвращению растрескивания.

Ключевые слова: жаропрочный сплав ХН62ВМЮТ-ВД, структура, размер зерна, фрактографический анализ, растровая электронная микроскопия, трещина

Для цитирования: Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Исследование причин образования трещин в сварных соединениях деталей из сплава ХН62ВМЮТ-ВД // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-13-22.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CRACKS IN WELDED JOINTS OF PARTS MADE OF ALLOY HN62VMYUT-VD

L.V. Morozova¹, V.B. Grigorenko², A.M. Terekhin²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Production complex «Salut» of joint stock company «United engine corporation», Moscow, Russia; info@uecrus.com

Abstract. The causes of cracking of the material of parts of complex configuration made of heat-resistant and heat-resistant nickel-based alloy HN62VMYUT-VD (EP708) after welding are investigated. To identify the causes of cracking, mechanical tests of samples from blanks of different melts were carried out, metallographic studies of blanks and finished parts were performed. A fractographic analysis of the surface of the exposed cracks was carried out. The grain size in different zones of the workpiece is investigated. Recommendations for the prevention of cracking are given.

Keywords: hot strength alloy HN62VMYUT-VD, structure, grain size, fractographic analysis, scanning electron microscopy, crack

For citation: Morozova L.V., Grigorenko V.B., Terekhin A.M. Investigation of the causes of cracks in welded joints of parts made of alloy HN62VMYUT-VD. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-13-22.

Введение

Жаропрочный никелевый деформируемый сплав ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД) используется для изготовления ответственных деталей большинства отечественных газотурбинных двигателей (ГТД). Сплав относится к группе материалов для дисков турбин высокого и низкого давления. Детали, изготовленные из данного сплава, работают при температурах до 800 °С и высоких нагрузках [1].

Свойства применяемых сплавов во многом определяют эксплуатационные характеристики как ГТД, так и стационарных энергетических установок. Детали, изготовленные из сплавов данной группы, должны иметь высокий уровень механических свойств во всем диапазоне рабочих температур и не иметь фазовых превращений, приводящих к существенному изменению служебных свойств в процессе длительной работы. Кроме того, в процессе горячей деформации технологические процессы должны приводить к получению оптимальной структуры, чтобы при дальнейшем изготовлении сборочной единицы обеспечить минимальные потери свойств [2–4].

Высокие требования, предъявляемые к качеству материалов, применяющихся в авиастроении, являются стимулом для совершенствования устаревших и разработки новых металлургических процессов на всех этапах передела. Применение современных металлофизических методов исследования дает возможность изучения и контроля на различных уровнях процессов, проходящих в жаростойких никелевых сплавах при их производстве и эксплуатации [5].

При исследовании материалов и причин эксплуатационных разрушений широко применяются методы как оптической, так и сканирующей электронной микроскопии. Это позволяет выявить размер зерен, наличие и количество неметаллических включений или пор, их расположение (дисперсное или строчечное), микроструктуру сплава, ее особенности или изменения, возникшие в процессе производства и эксплуатации [6].

Характер и рельеф разрушения, условия зарождения и развития трещин можно оценить методами фрактографии путем исследования сформировавшегося излома. Результаты фрактографических исследований учитываются при оценке эксплуатационных разрушений, отказов техники, аварийных ситуаций. Особенности развития трещины позволяют путем фрактографического анализа выявить слабые места материала, анализ расположения трещин в деталях позволяет установить слабые места конструкций, обосновать и провести работы по их изменению [7, 8].

Исследованию структуры сплава ЭП708 посвящено достаточное количество статей, однако в настоящее время основное внимание уделяется управлению структурой, полученной методами селективного лазерного сплавления (СЛС). Пока данная методика не позволяет получить оптимальную структуру и уровень свойств, характерных для материалов, изготовленных по технологии классической металлургии [9–13].

Химический состав жаропрочного никелевого дисперсионно-твердеющего деформируемого сплава ЭП708 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ЭП708

Сплав	Содержание элементов*, % (по массе)								
	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe	Si	Mn	C
ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708) (ГОСТ 5632–2014)	17,5–20,0	5,5–7,5	4,0–6,0	1,9–2,3	1,0–1,4	≤4,0	≤0,6	≤0,3	≤0,1

* Ni – основа; Се ≤0,03 % (по массе); В ≤0,008 % (по массе).

Сплав имеет поликристаллическую структуру, представляет собой содержащий карбиды γ -твердый раствор с гранцентрированной кубической решеткой и когерентную

ему γ' -фазу (интерметаллидное соединение на основе $Ni_3(Al, Ti)$), упрочняющую матрицу. Прочность γ' -фазы увеличивается по мере роста температуры, а ее наследственная пластичность предотвращает охрупчивание сплава. Состав и размер γ' -фазы зависят от содержания алюминия и титана и напрямую влияют на жаростойкость сплава. Дополнительное упрочнение достигается за счет выделения карбидов типа $Me_{23}C_6$ и Me_6C на основе тугоплавких элементов, таких как Cr, Mo и W. Эти элементы также могут входить в состав γ' -фазы, увеличивая ее содержание. После термической обработки желательным является наличие равномерно распределенных карбидов типа Me_6C по телу зерен и отсутствие выделений карбидов и топологически плотноупакованных фаз по их границам. Наибольшая жаропрочность никелевых деформируемых сплавов достигается после закалки и старения, после которых образуется мелкодисперсная γ' -фаза, тормозящая пластическую деформацию в материале [14, 15].

Необходимо отметить, что в жаропрочных сплавах при высоких степенях горячей деформации возможно протекание динамической рекристаллизации, причем критическая степень деформации, которая необходима для начала рекристаллизации, увеличивается с ростом скорости деформации и с понижением температуры. Поэтому при горячей обработке давлением накопленная внутри металла энергия и получаемое в результате процессов рекристаллизации структурное состояние зависят от изменяющихся в широких пределах температуры и скорости деформации. Это многократно усложняет процесс получения структуры с заданными свойствами [16].

Для снижения массы узлов ротора перспективных ГТД применяются сварные конструкции компрессора высокого давления из свариваемых никелевых сплавов, не уступающих по механическим и прочностным свойствам серийно применяемым несвариваемым сплавам и способных выдерживать воздействие длительных нагрузок, высоких рабочих температур и агрессивных сред. В строительстве, энергетике, металлообрабатывающих отраслях промышленности сварные технологии являются базовыми и становятся неотъемлемой частью производственного цикла. Часто сварочный процесс – это единственно возможный или наиболее эффективный способ создания неразъемных соединений конструкционных материалов, позволяющий повысить коэффициент использования сплава и при этом снизить энергоемкость производства готовых изделий. С повышением жаропрочности в сплавах наблюдается снижение таких важных характеристик свариваемости, как сопротивляемость образованию трещин при сварке и дальнейшей термообработке, в то время как к материалам такого типа предъявляются требования по образованию качественных сварных соединений. Согласно работе [17], независимо от технологии сварки, размеров образцов и режимов термообработки наименьшую склонность к образованию горячих трещин проявляют сплавы, подобные сплаву ЭП708, с содержанием, % (по массе): $\leq 2,7$ алюминия, $\leq 3,7$ титана и $\leq (10-12)$ γ' -фазы после старения.

Возникновение трещин при термообработке жаропрочных никелевых сплавов чаще всего наблюдается в сварных соединениях с высоким уровнем остаточных напряжений. Для уменьшения растрескивания и предотвращения возникновения термических трещин рекомендуется оптимизировать технологию сварки, применять присадочные материалы из гомогенных сплавов – например, ЭП367 и ЭК-22. Рекомендуется также проводить термообработку по схеме: закалка + сварка + закалка + старение.

Применение закалки после проведения сварки дисперсионно-твердеющих сплавов практически не оказывает влияния на кратковременную прочность, незначительно снижает значения длительной прочности и вызывает некоторое повышение ударной вязкости и пластичности. При оценке состояния сварного шва и околошовной зоны методами металлографии необходимо убедиться, что зерна не укрупнились, а на границах

зерен отсутствуют следы оплавления. Недопустимым также является выделение по границам частиц упрочняющей фазы, так как все вышеперечисленные признаки приводят к снижению прочностных характеристик [17].

В данной статье проведено комплексное исследование полуфабрикатов заготовок сварных раскатных колец из сплава ЭП708-ВД и предпринята попытка оценить влияние величины зерна на склонность к образованию трещин после сварки.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, полученные результаты являются продуктом деятельности АО «ОДК».

Материалы и методы

Исследование заготовок сварных раскатных колец и изготовленных из них деталей из сплава ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД) с растрескиванием в местах сварки выполняли методами оптической металлографии на микроскопах фирм Olympus и Leica в соответствии с ГОСТ 5639–82, фрактографии и металлографии высокого разрешения – на растровом электронном микроскопе фирмы Zeiss.

Подготовку металлографических шлифов осуществляли на оборудовании фирмы Struers.

Оценку уровня механических свойств (испытания на ударный изгиб, малоцикловую усталость и длительную прочность при температуре 800 °С) проводили на испытательном оборудовании в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9454–78, ГОСТ 10145–81, ГОСТ 25.502–79 и ТУ 14-1-1018–98.

Результаты

Проведено комплексное исследование причин появления трещин в сварных деталях, произведенных из заготовок сварных раскатных колец из сплава ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД). После выполнения сварки и старения в тонком сечении деталей на разных стадиях изготовления выявили дефекты в виде трещин. Анализ технологической документации показал, что деталь изготавливали путем механической обработки из кольца сварного профиля сечением 55×42 мм и поставляли в закаленном состоянии (выдержка 1 ч при температуре 1140 °С, охлаждение на воздухе).

При визуальном исследовании сварных деталей установлено, что во всех случаях участки растрескивания располагались в самом тонком сечении толщиной 1,2 мм на расстоянии приблизительно 4–6 мм от сварного шва (рис. 1), соединяющего разноименные детали. Выявлены как сквозные трещины, так и трещины, развивающиеся на глубину до ¼ сечения детали. Окисление участков поверхности изломов до черного цвета свидетельствует о возникновении трещин после кольцевой сварки деталей, до проведения термической обработки (старения).

Исследование поверхности изломов вскрытых трещин на растровом электронном микроскопе (рис. 2) показало, что разрушение статическое, проходит по границам крупных зерен, на некоторых участках поверхность излома окислена. В доломе разрушение вязкое, внутризеренное, с формированием ямочного рельефа.

Для определения соответствия механических свойств материала требованиям нормативной документации и проведения механических испытаний, из массива заготовок сварных раскатных колец вырезали образцы как из области проявления растрескивания, так и на удалении от нее. Полученные результаты приведены в табл. 2 и 3. Установлено, что характеристики прочности и пластичности испытанных образцов удовлетворяют требованиям ТУ 14-1-1018–98.

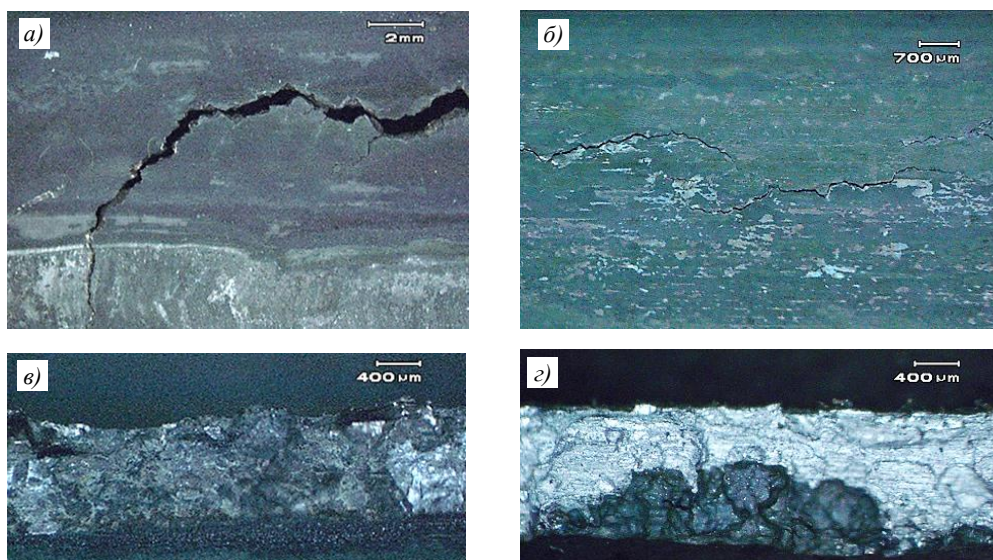


Рис. 1. Характерный вид трещин на поверхности (а, б) и изломов (в, г)

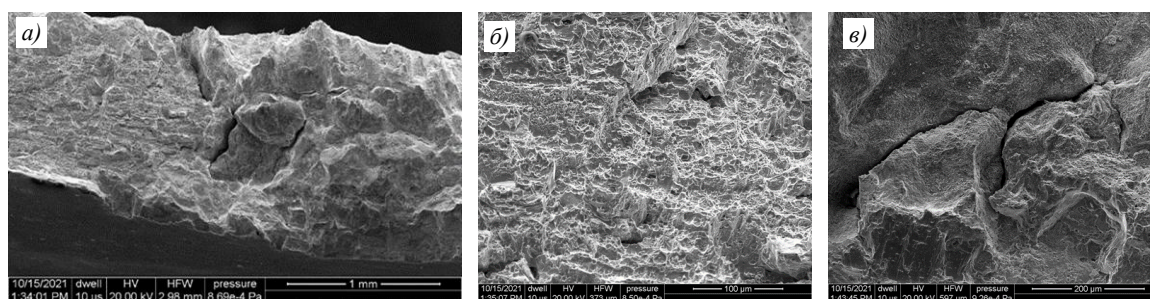


Рис. 2. Вид излома по трещине: а – характерное строение; б – вязкое внутризеренное разрушение; в – межзеренное разрушение

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов из заготовок при температуре 20 °С

Заготовка	Образец	σ_T	σ_B	δ	ψ	КСУ, МПа
		МПа		%		
1	11	697	1128	26,6	27,2	0,92
	12*	700	1144	280,	31,5	0,85
2	22	753	1167	26,4	30,6	0,72
	21*	737	1161	25,1	30,6	0,78
ТУ 14-1-1018-98		≥ 690	≥ 1080	$\geq 18,0$	$\geq 20,0$	—

* Массив в зоне образования трещин.

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов из заготовок при температуре 800 °С

Заготовка	Образец	σ_T	σ_B	δ	ψ	Длительная прочность при напряжении 290 МПа
		МПа		%		
1	11	669	799	26,9	33,1	50 ч (снят)
	12*	656	821	32,3	39,2	50 ч (снят)
2	22	649	820	24,1	33,7	50 ч (снят)
	21*	674	821	30,3	35,4	50 ч (снят)
ТУ 14-1-1018-98		≥ 60	≥ 70	$\geq 14,0$	$\geq 25,0$	≥ 50 ч

* Массив в зоне образования трещин.

Далее проведены исследования структуры материала деталей с трещинами на различных уровнях. На рис. 3 приведены фотографии макроструктуры заготовки 1. Во всех исследованных деталях наблюдаются участки с крупным зерном. Установлено, что участки с зерном размером 0,5–1 мм (номер 0–1) расположены в зонах, соответствующих боковым поверхностям исходной заготовки. В центральной части деталей величина зерна соответствует номеру 3–5 по ГОСТ 5639–82. Видно, что в зоне сварного шва на все сечение исследуемой детали приходится всего 1–2 зерна, причем на приваренной детали, произведенной по схожей технологии, в зоне сварного шва присутствует мелкое зерно.

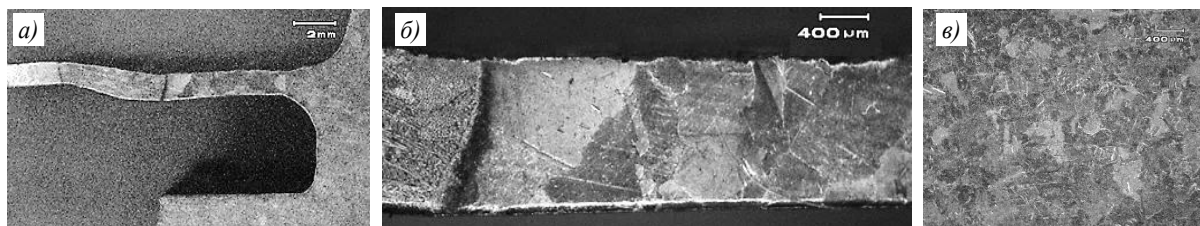


Рис. 3. Макроструктура детали в зоне образования трещин (торец заготовки) (а); микроструктура: б – крупные зерна в зоне образования трещин; в – мелкие зерна в середине детали

Исследование характерной микроструктуры сплава ЭП708 в массиве детали показало, что в структуре наблюдаются зерна γ -фазы с равномерно распределенными по телу зерна карбидами. Зернограничные выделения частиц упрочняющей фазы отсутствуют.

При исследовании микроструктуры на шлифах, изготовленных в поперечном сечении детали, подтверждено, что трещины в ее тонком сечении развивались по границам зерен (рис. 4), поверхность трещин окислена (как и наружная поверхность детали). Вблизи сварного шва наблюдались зерна размером до 450 мкм, что соответствует номеру зерна 0–1 по ГОСТ 5639–82. В области массива материала некоторых из исследованных деталей наблюдается разнотерность с величиной зерен, изменяющейся от 50 до 120 мкм (номер зерна 3–5). В то же время материал сопряженной детали из сплава той же марки имеет структуру с размером зерен, не превышающим 50–70 мкм.

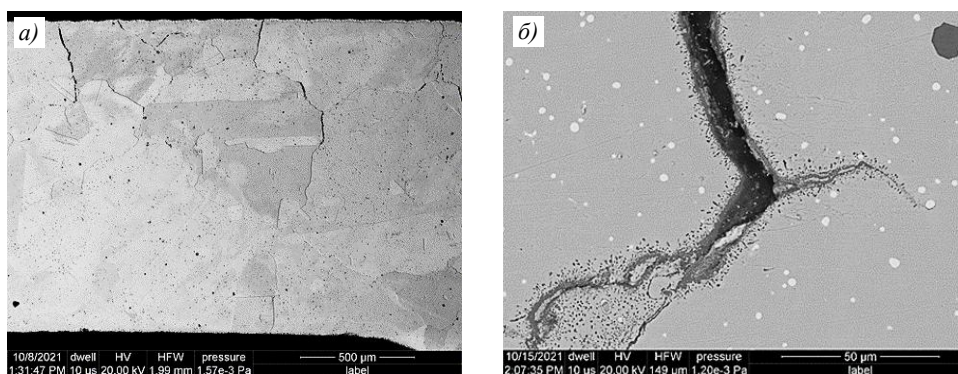


Рис. 4. Трещины на поверхности детали по границам зерен (а) и окисленная поверхность трещины (б)

Анализ структуры выявил на некоторых участках деталей с трещинами частично рекристаллизованные зерна, показанные на рис. 5.

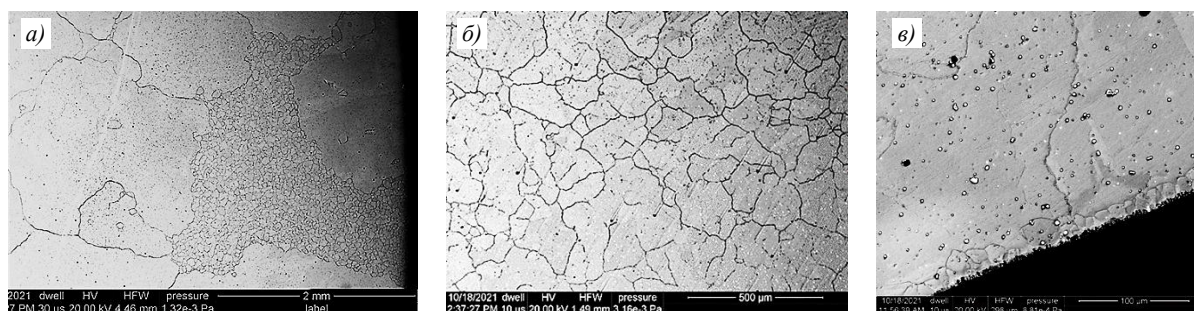


Рис. 5. Рекристаллизованные зерна в исследованных деталях: *а* – участок с крупными и мелкими зернами; *б* – мелкие зерна; *в* – мелкие и крупные зерна по краю заготовки

Обсуждение и заключения

Никелевый жаропрочный сплав ЭП708-ВД не имеет фазовых превращений в твердом состоянии. При термической обработке возможно лишь растворение (при гомогенизации – нагреве до высоких температур и достаточной выдержке) или выделение (при охлаждении с достаточной скоростью) вторичных фаз, в том числе упрочняющих – например, при старении. Изменение величины зерна достигается только в процессе рекристаллизации деформированного с определенной степенью деформации материала.

Согласно работе [16], в аустенитных сплавах в процессе высокотемпературной пластической деформации с подавлением процесса рекристаллизации возникает особое структурное состояние, характеризующееся наличием зубчатых границ. Образование зубчатости может свидетельствовать о проходящем в приграничных объемах зерен процессе полигонизации, т. е. начальной стадии рекристаллизации. Наличие неровностей на границах зерен способствует повышению уровня механических свойств деформированного материала по сравнению с материалом в равновесном состоянии после отжига. По-видимому, именно это обуславливает соответствие механических свойств материала исследованных деталей установленному технической документацией уровню.

Выявление трещин на нескольких деталях, изготовленных из раскатных колец одной партии, может свидетельствовать о неоднородности структуры исходного материала по сечению заготовок.

При анализе микроструктуры растрескавшихся после сварки деталей в торцах заготовок обнаружены крупные зерна, внутри которых частично выявляются границы рекристаллизованных зерен, а также единичные кристаллиты, внутри которых находятся мелкие рекристаллизованные зерна. Границы крупных зерен неровные, что характерно для неравновесной структуры с незаконченным процессом рекристаллизации.

Обнаруженные частично рекристаллизованные зерна предположительно могли образоваться из-за неоднородной степени деформации материала по сечению заготовки, нагрев которой при термической обработке и сварке вызвал рост зерен и «запустил» процесс рекристаллизации в отдельных наиболее деформированных зернах с подходящей ориентировкой.

Вероятно, степень обжата была недостаточна для достижения равномерной по величине зерен и степени деформации структуре, что при дальнейших нагревах и вызвало рост зерен в тонких сечениях детали при сварке. Соответственно, некоторое увеличение степени обжата при проведении горячей деформации может избавить в дальнейшем от возникновения трещин по границам крупных зерен при сварке сложных деталей из сплава ЭП708-ВД.

Список источников

1. Востриков А.В., Ломберг Б.С., Летников М.Н., Овсепян С.В. Современные жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ВИАМ для деталей ГТД // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства»*. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 5–14.
2. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Гаврилов Г.Н., Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т. и др. *Материаловедение. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие*. Саранск: Нац. иссл. Морд. гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2019. 276 с.
4. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 2. С. 25–30.
5. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Раевских А.Н., Зайцев Д.В. Исследование структурно-фазового состояния жаропрочных никелевых деформируемых сплавов с применением комплекса высокоразрешающих методов электронной микроскопии // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства»*. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 122–131.
6. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // *Труды ВИАМ*. 2013. № 5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2022).
7. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
8. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. *Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций*. М.: Изд-во МИСИС, 2007. 259 с.
9. Шевяков В.Ф., Грицюк А.А., Климов Д.А. и др. Освоение производства жаропрочных никелевых сплавов в ПАО «Русполимет». Результаты и перспективы // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Перспективные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их переработки»*. М.: ВИАМ, 2018. С. 75–79.
10. Хомутов М.Г., Травянов А.Я., Петровский П.В., Чеверикин В.В. Структура и свойства ЭП708, полученного в процессе послыонного лазерного плавления // *Цветные металлы*. 2018. № 4. С. 49–55.
11. Хомутов М.Г., Травянов А.Я., Петровский П.В. и др. Сравнение усталостных характеристик образцов сплава ЭП708, полученных методами селективного лазерного плавления и горячей прокатки // *Металлург*. 2018. № 3. С. 84–88.
12. Горбовец М.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Соппротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
13. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость при высоких температурах жаропрочного никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73.
14. Тренингов И.А., Заводов А.В., Петрушин Н.В. Исследование кристаллической структуры и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, после высокотемпературных механических испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.
15. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Ломберг Б.С., Морозова Г.И. Эволюция структуры и фазового состава деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД с усложнением их легирования // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 3 (717). С. 8–12.

16. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов: в 2 т. М.: Metallurgy, 1968. Т. 1. 596 с.
17. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. № 4. С. 4–11. URL: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/1996/1996-202214.pdf> (дата обращения: 18.07.2022).

References

1. Vostrikov A.V., Lomberg B.S., Letnikov M.N., Ovsepyan S.V. Modern heat-resistant wrought nickel alloys of VIAM for gas turbine engine parts. *Materials of All-Rus. sci.-tech. conf. "Modern heat-resistant nickel wrought alloys and technologies for their production"*. Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, pp. 5–14.
2. Kablov E.N. The key problem is materials. *Trends and guidelines for Russia's innovative development*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
3. Gavrilov G.N., Kablov E.N., Erofeev V.T. et al. Material science. Theory and technology of heat treatment: textbook. allowance. Saransk: National Research Mordovia State University im. N.P. Ogareva, 2019, 276 p.
4. Lomberg B.S., Bakradze M.M., Chabina E.B., Filonova E.V. Interrelation of structure and properties of high-heat resisting nickel alloys for disks of gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 25–30.
5. Chabina E.B., Filonova E.V., Raevskikh A.N., Zaitsev D.V. Investigation of the Structural-Phase State of Heat-Resistant Nickel Wrought Alloys Using a Complex of High-Resolution Electron Microscopy Methods. *Materials of All-Rus. sci.-tech. conf. "Modern heat-resistant nickel wrought alloys and technologies for their production"*. Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, pp. 122–131.
6. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Application of methods of analytical microscopy and X-ray of the structural analysis for research of structural and phase condition of materials. *Trudy VIAM*, 2013, no. 5, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2022).
7. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
8. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractodiagnostics of destruction of metallic materials and structures*. Moscow: MISIS, 2007, 259 p.
9. Shevyakov V.F., Gritsyuk A.A., Klimov D.A. et al. mastering the production of heat-resistant nickel alloys in PJSC Ruspolymet. Results and prospects. *Materials of All-Rus. sci.-tech. conf. "Modern heat-resistant nickel wrought alloys and technologies for their production"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 75–79.
10. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractodiagnostics of destruction of metallic materials and structures*. Moscow: MISIS, 2007, 259 p.
11. Khomutov M.G., Travyanov A.Ya., Petrovsky P.V. Comparison of the fatigue characteristics of EP708 alloy samples obtained by selective laser melting and hot rolling. *Metallurg*, 2018, no. 3, pp. 84–88.
12. Gorbovets M.A., Belyayev M.S., Ryzhkov P.V. Fatigue strength of heat-resistant nickel alloys produced by selective laser melting. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
13. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue at high temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73.
14. Treninkov I.A., Zavodov A.V., Petrushin N.V. Research of crystal structure and microstructure of the ZhS32-VI nickel-base superalloy synthesized by selective laser fusion method, after high-temperature mechanical tests. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.

15. Chabina E.B., Filonova E.V., Lomborg B.S., Morozova G.I. Evolution of the structure and phase composition of deformable heat-resistant nickel alloys for GTE disks with increasing complexity of their alloying. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2015, no. 3 (717), pp. 8–12.
16. Bernstein M.L. *Thermomechanical treatment of metals and alloys*: in 2 vols. Moscow: Metallurgiya, 1968, vol. 1, 596 p.
17. Sorokin L.I. Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 4, pp. 4–11.

Информация об авторах

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Григоренко Валентина Борисовна, ведущий инженер, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Терехин Андрей Михайлович, начальник центральной заводской лаборатории, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Information about the authors

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina B. Grigorenko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Andrey M. Terekhin, Head of central plant laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.09.2022.

The article was submitted 26.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 07.09.2022.