

УДК 669.245

М.Н. Летников¹, Б.С. Ломберг¹, О.Г. Оспенникова¹, М.М. Бакрадзе¹**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ175-ИД**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-21-30

Исследовано влияние скорости закалки на размер вторичных частиц упрочняющей γ' -фазы и механические свойства деформируемого жаропрочного дискового сплава ВЖ175-ИД. Показано, что наибольшее влияние на средний размер и морфологию вторичных γ' -частиц при закалке из двухфазной области оказывает скорость охлаждения в интервале температур до 1000°C. Исследована взаимосвязь между скоростью охлаждения, размером частиц γ' -фазы и значениями кратковременной и длительной прочности сплава ВЖ175-ИД. Определена необходимая скорость охлаждения при закалке изделий из жаропрочного сплава ВЖ175-ИД для достижения значений механических свойств: $\sigma_b^{20^\circ} \geq 1570$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20^\circ} \geq 1175$ МПа и времени до разрушения более 100 ч при испытаниях на длительную прочность при температуре 650°C и постоянной нагрузке $\sigma = 1050$ МПа.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, закалка, скорость охлаждения, γ' -фаза, механические свойства, сплав ВЖ175-ИД.

М.Н. Letnikov¹, B.S. Lomberg¹, O.G. Ospennikova¹, M.M. Bakradze¹**INFLUENCE OF QUENCH RATE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL-BASED WROUGHT SUPERALLOY VZh175-ID**

The influence of the quenching rate on the size of the secondary particles of the strengthening γ' -phase microstructure as well as on the mechanical properties of nickel-based superalloy VZh175-ID has been studied. It was shown, that cooling rate in the temperature range of up to 1000°C has significant effect on mean size of the secondary γ' -precipitates and their morphology during quenching. There was studied the relationship between the cooling rate, mean size of the secondary γ' -precipitates and short- and long-term strength of VZh175-ID alloy. The required quenching rate is determined to achieve the desired level of properties: $\sigma_b^{20^\circ} \geq 1570$ MPa, $\sigma_{0,2}^{20^\circ} \geq 1175$ MPa, life time to rupture is more than 100 hours at temperature 650°C and tension $\sigma = 1050$ MPa.

Keywords: Ni-based superalloy, quenching, cooling rate, gamma prime, mechanical properties, superalloy VZh175-ID.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Для изготовления дисков турбины и компрессора высокого давления авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе. Эти материалы должны обладать высокой прочностью, чтобы выдерживать экстремальные температуры и напряжения, которые возникают в дисках при работе ГТД. При этом для новых изделий конструкторам требуются все более высокопрочные и жаропрочные материалы.

Во ФГУП «ВИАМ» для дисков ГТД, в том числе для двигателя ПД-14, разработан высокопрочный деформируемый никелевый сплав ВЖ175 [1, 2]. Этот сплав обладает уникальным комплексом свойств, включающим высокую крат-

ковременную и длительную прочность, сопротивление циклической усталости, а также структурную стабильность при рабочих температурах [3–5]. Сплав относится к классу жаропрочных дисперсноупрочняемых поликристаллических материалов на никелевой основе, прочность которых зависит от химического состава и микроструктуры.

Значительный вклад в упрочнение этих сплавов вносят когерентные γ' -частицы матрицы, которые препятствуют движению дислокаций при высоких температурах [6, 7]. Параметры γ' -фазы (размер, форма и характер распределения частиц) влияют на уровень механических свойств никелевых сплавов – особенно на предел текучести и длительную прочность [8–12]. В свою очередь, размер и морфология γ' -частиц могут сильно

меняться в зависимости от скорости охлаждения при закалке [13–20]. Исследования показали, что при быстром охлаждении с температур закалки в жаропрочных никелевых сплавах формируются мелкие частицы γ' -фазы округлой или близкой к кубической формы, при этом прочность при растяжении и длительная прочность увеличиваются. Напротив, при медленном охлаждении частицы γ' -фазы становятся значительно крупнее, а их морфология более сложной, что приводит к снижению значений кратковременной и длительной прочности. Данная зависимость в жаропрочных никелевых сплавах проявляется как при закалке выше температуры сольвус – полного растворения γ' -фазы ($T_{п.р.\gamma'}$), так и при закалке из двухфазной области – ниже $T_{п.р.\gamma'}$ [21, 22].

На практике такая взаимосвязь механических свойств и скорости охлаждения приобретает особое значение, поскольку при закалке крупногабаритных штамповок дисков из жаропрочных никелевых сплавов охлаждение в разных частях заготовок может сильно различаться, что, в свою очередь, может приводить к существенному снижению прочности в наиболее массивных сечениях диска [23].

Цель данной работы – исследование зависимости между скоростью охлаждения при закалке, размером и морфологией частиц γ' -фазы и механическими свойствами жаропрочного деформируемого дискового сплава ВЖ175-ИД.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [24].

Материалы и методы

В работе использовали деформированные заготовки из сплава ВЖ175-ИД, полученные на промышленном оборудовании по серийной технологии, включающей вакуумную индукционную выплавку электродов, вакуумно-дуговой переплав электродов в слитки и последующую многостадийную деформацию на гидравлических прессах [25]. Размер микрзерна в деформированных заготовках из сплава ВЖ175-ИД составляет около 15–20 мкм.

Температуры растворения и выделения γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии на установке DSC-404. Для определения критических температур использовали двойной цикл «нагрев ⇌ охлаждение», в процессе которого один и тот же образец нагревали до заданной температуры, а затем охлаждали, после чего цикл повторяли снова.

Нагрев и выдержку под закалку проводили в камерных электрических печах Nabertherm

LT15/13/C450. Скорость охлаждения измеряли с помощью платиновой термопары, зачеканенной в центр цилиндрического контрольного образца диаметром 18 мм и длиной 70 мм. Интервал регистрации данных во время охлаждения составлял 1 с.

Исследование микроструктуры после электролитического травления проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 и на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU 8010, снабженном рентгеновским детектором Oxford Instruments X-Max (80 мм²), при ускоряющем напряжении 15–20 кВ. Количественный анализ частиц упрочняющей γ' -фазы выполнен в программе анализа изображений Image Expert Pro.

Испытания на растяжение и длительную прочность проводили на цилиндрических образцах с рабочей частью диаметром $d=5$ мм и длиной $l=5d$ по ГОСТ 1497 и ГОСТ 10145 соответственно.

Результаты и обсуждение

Процесс выделения γ' -частиц из пересыщенного γ -твердого раствора в жаропрочных никелевых сплавах начинается ниже температуры растворения упрочняющей фазы. В зависимости от химического состава температура сольвус γ' -фазы и ее объемная доля в сплавах может варьироваться. При этом наибольший объем упрочняющей фазы в жаропрочных никелевых сплавах, как правило, выделяется на начальном этапе охлаждения. Необходимо отметить, что при закалке из двухфазной области выделение частиц γ' -фазы начинается непосредственно после выгрузки материала из закалочной печи.

Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) показывают, что при охлаждении сплава ВЖ175-ИД из двухфазной области наибольший экзотермический эффект наблюдается в интервале температур от $T_{зак}=1145$ до 900–1000°C с пиком при 1132°C при первом охлаждении и 1131°C при повторном цикле (рис. 1). Очевидно, что именно в этом интервале γ' -фаза выделяется максимально интенсивно и, соответственно, скорость охлаждения до температур 1000–900°C при закалке будет оказывать наибольшее влияние на размер и морфологию γ' -фазы и свойства сплава ВЖ175-ИД. Для экспериментального подтверждения этого вывода проведена закалка заготовок под образцы с температуры 1145°C на воздухе и по двухступенчатому режиму, включающему участок медленного охлаждения до температур 1000–900°C и последующую быструю закалку под вентилятором со скоростью охлаждения $V_{охл} \approx 250^\circ\text{C}/\text{мин}$. Схематично режимы охлаждения показаны на рис. 2.

После закалки проводилось двухступенчатое старение по серийному режиму при 850 и 760°C. Далее из заготовок изготавливали образцы для проведения испытаний на растяжение при 20°C и длительную прочность при 650°C и напряжении

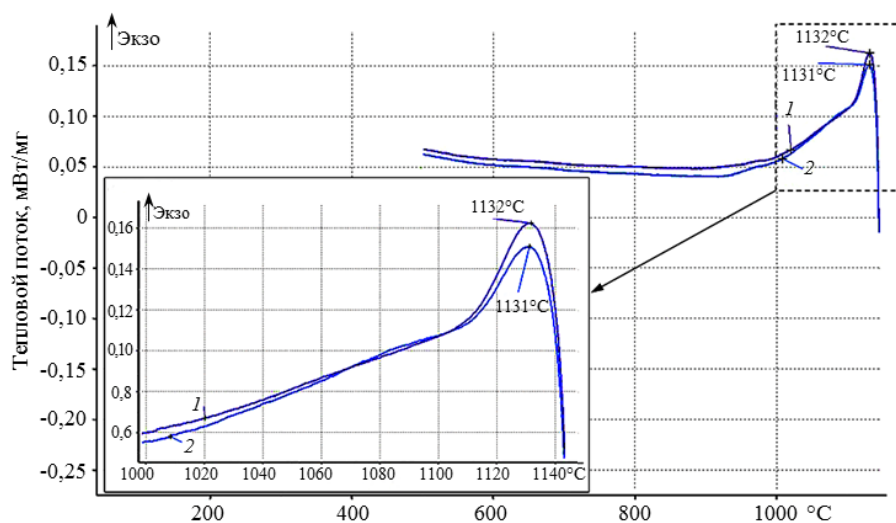


Рис. 1. Кривые ДСК при охлаждении образца из сплава ВЖ175-ИД с температуры 1145°C при первом цикле охлаждения (1) и при повторном охлаждении (2)

1050 МПа. Результаты испытаний показывают, что у образцов, закаленных по двухступенчатому режиму с начальным участком медленного охлаждения со скоростью 21 и 25,6°C/мин до температур 1000–900°C, пределы прочности и текучести в среднем на 74 и 127 МПа меньше, чем у образцов, закаленных на воздухе с $V_{\text{охл}}=127^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур 1145–1000°C. Время до разрушения при испытаниях на длительную прочность у образцов, охлажденных на воздухе, в несколько раз превышает эти значения у образцов с двухступенчатым охлаждением. Средние значения пластичности (δ и ψ) у образцов с медленным охлаждением незначительно больше (табл. 1).

Следует отметить, что у образцов с двухступенчатым охлаждением независимо от температуры, с которой проводилось быстрое охлаждение, значение предела текучести меняется незначительно.

Исследования микроструктуры образцов после испытаний выявили существенные различия размера и морфологии вторичных частиц γ' -фазы. На рис. 3 приведена типичная микроструктура образцов с закалкой на воздухе (рис. 3, а) и двухступенчатым охлаждением (рис. 3, б). Видно, что охлаждение на воздухе со скоростью 127°C/мин приводит к формированию вторичных частиц близкой к кубической формы. Средний диаметр, эквивалентный площади частиц γ' -фазы ($D_{\text{ср.экв}\gamma'}$) составляет 195,8 нм. При медленном охлаждении до температур 1000–900°C (далее – на воздухе) распределение частиц по размеру и форме имеет выраженный бимодальный характер. В структуре присутствуют крупные вторичные γ' -частицы сложной формы размером $D_{\text{ср.экв}\gamma'}=413,6$ нм и гораздо более мелкие частицы размером <50 нм.

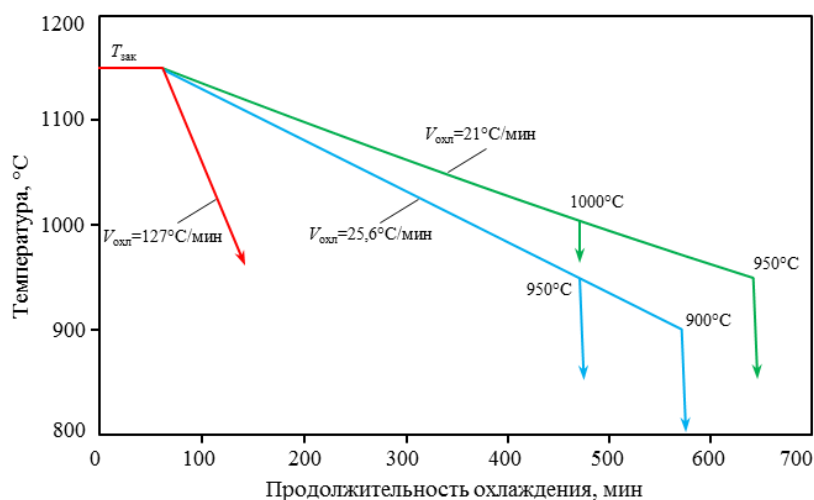


Рис. 2. Схема охлаждения образцов из сплава ВЖ175-ИД

Результаты испытаний образцов из сплава ВЖ175-ИД с закалкой по режимам 1, 2, 3 и старением по серийному режиму

Режим охлаждения		$\sigma_B^{20^\circ}$	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	δ^{20°	ψ^{20°	Длительная прочность, ч, при 650°C, $\sigma=1050$ МПа
		МПа		%		
1	127°C/мин	1646*	1202*	15,3*	15,3*	376,67; 329
2	21°C/мин до 1000°C	1600	1080	20	20	96,5
	21°C/мин до 950°C	1530	1065	16,3	15,4	57,37; 109,33
3	25,6°C/мин до 950°C	1580	1090	19	16,5	–
	25,6°C/мин до 900°C	1590	1070	20	17	–
	25,6°C/мин до 900°C	1560	1070	17	14,3	–

* Средние значения.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что для сплава ВЖ175-ИД при закалке из двухфазной области наибольшее влияние на уровень кратковременной и длительной прочности оказывает скорость охлаждения в интервале температур $T_{зак} \rightarrow 1000^\circ\text{C}$.

Для более детального исследования взаимосвязи между скоростью охлаждения, параметрами

γ' -фазы и уровнем механических свойств проведена серия экспериментов, включающая закалку образцов из сплава ВЖ175-ИД с различной скоростью охлаждения, исследование микроструктуры образцов в закаленном состоянии и после старения, а также испытания на растяжение при 20°C и длительную прочность при 650°C. Для получения различных скоростей охлаждения

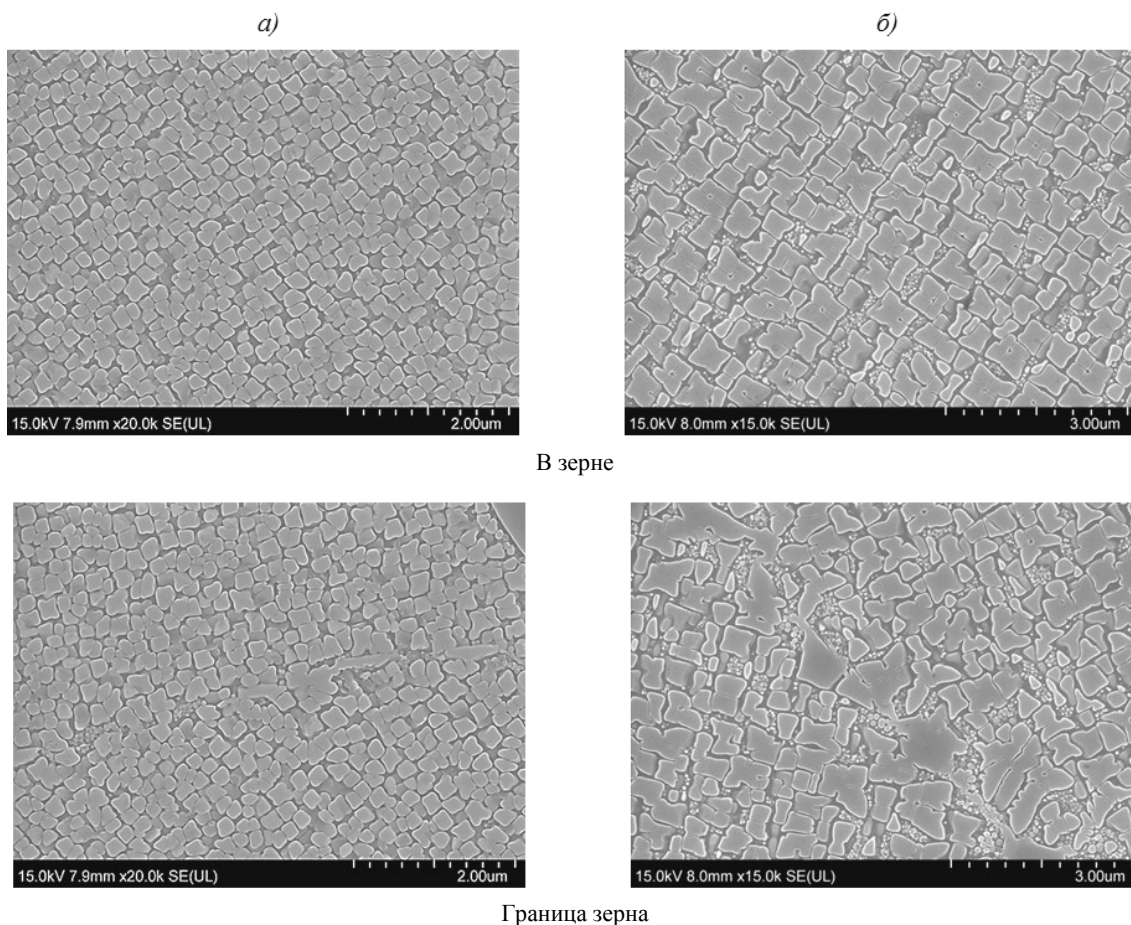


Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава ВЖ175-ИД после полной термообработки: а – закалка с охлаждением на воздухе при $V_{охл}=127^\circ\text{C}/\text{мин}$; б – закалка с двухступенчатым охлаждением при $V_{охл}=21^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 1000°C (далее – на воздухе)

Таблица 2

Скорость охлаждения заготовок из сплава ВЖ175-ИД

Способ охлаждения	Скорость охлаждения, °С/мин
В масле	630
Под вентилятором	339; 245; 195
На воздухе в стальных накладках	66; 49
С печью	5,7

образцов из сплава ВЖ175-ИД использовали закалку в масле, с принудительным обдувом под вентилятором, на воздухе в стальных теплоизолирующих накладках различной толщины и охлаждение с печью. Скорость охлаждения ($V_{\text{охл}}$) рассчитывали как среднее значение в интервале температур 1145→1000°С, данные для различных вариантов охлаждения приведены в табл. 2. Следует отметить, что скорости охлажде-

ния 66 и 49°С/мин сопоставимы с теми, что реализуются при закалке крупногабаритных штамповок дисков в промышленных условиях. Высокие скорости (~100°С/мин и более) характерны для приповерхностного слоя металла или очень тонких сечений.

Типичная микроструктура частиц γ' -фазы после закалки с различной скоростью охлаждения показана на рис. 4, средний эквивалентный

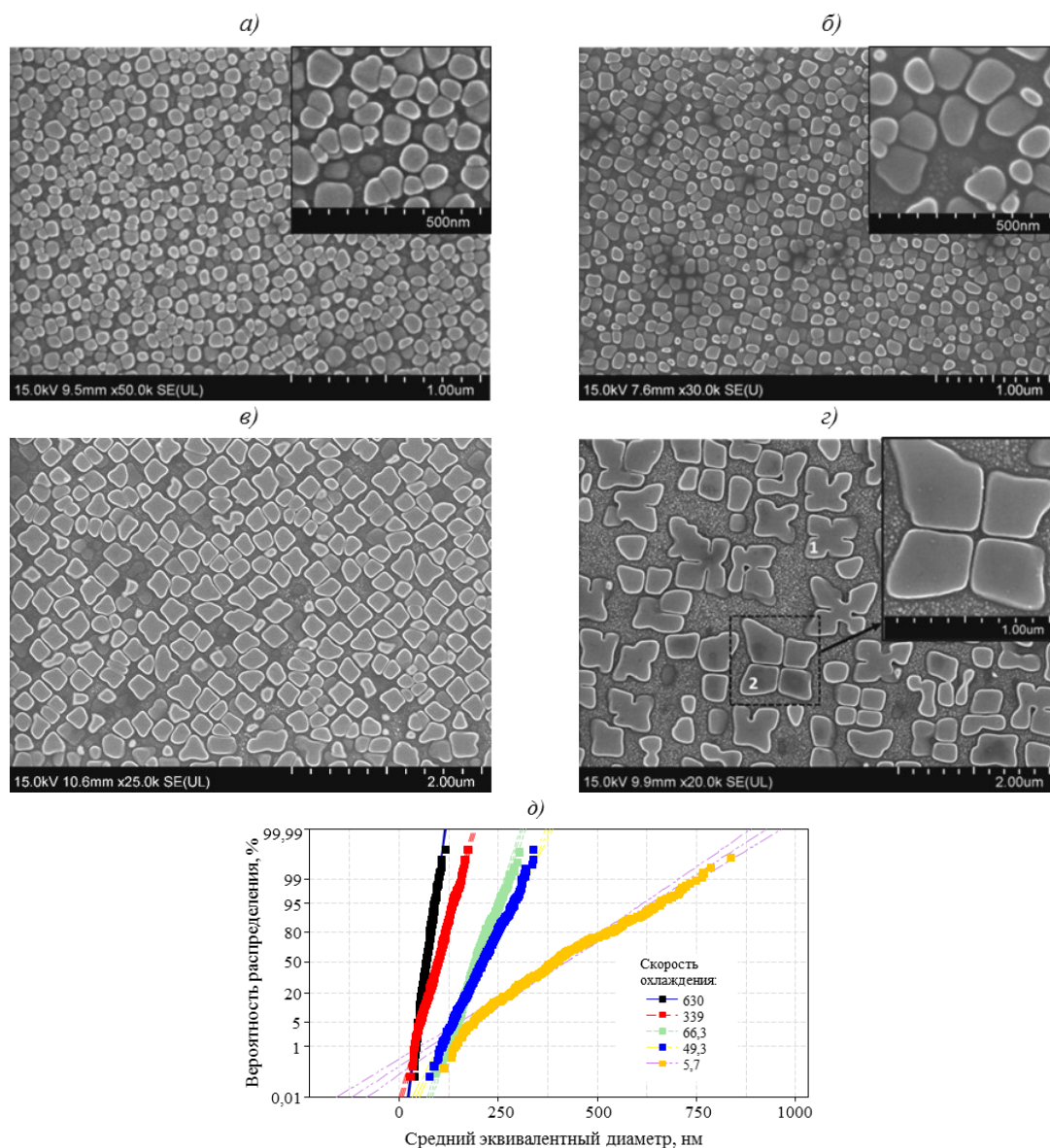


Рис. 4. Вторичные γ' -частицы в сплаве ВЖ175-ИД после закалки: а – закалка в масле с $V_{\text{охл}}=630^\circ\text{C}/\text{мин}$; б – закалка под вентилятором с $V_{\text{охл}}=339^\circ\text{C}/\text{мин}$; в – закалка на воздухе с $V_{\text{охл}}=49^\circ\text{C}/\text{мин}$; г – охлаждение с печью с $V_{\text{охл}}=5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$; д – распределение частиц γ' -фазы по размеру

Средний размер γ' -частицы ($D_{\text{ср.экв}}$) в сплаве ВЖ175-ИД в закаленном состоянии при различной скорости охлаждения

Скорость охлаждения, °С/мин	$D_{\text{ср.экв}}$, нм	СКО
630	69,4	12,42
339	97,2	24,79
66,3	195,3	31,37
49,3	210,6	45,47
5,7	402,8	140,8

диаметр γ' -частиц и среднее квадратическое отклонение (СКО) приведены в табл. 3.

После закалки в масле со скоростью охлаждения $\sim 630^\circ\text{C}/\text{мин}$ в сплаве ВЖ175-ИД вторичные γ' -частицы имеют преимущественно округлую форму и средний размер $D_{\text{ср.экв}}=69,4$ нм. Охлаждение со скоростью $339^\circ\text{C}/\text{мин}$ приводит к увеличению среднего размера частиц до 97,2 нм, а их форма становится близкой к кубической. При относительно низких скоростях охлаждения 66 и $49^\circ\text{C}/\text{мин}$ формируются значительно более крупные частицы вторичной γ' -фазы – соответственно 195 и 210 нм, которые сохраняют преимущественно кубическую форму. В то же время в структуре присутствуют более крупные частицы неправильной формы. Характер распределения $\gamma'_{\text{вт}}$ -фазы (рис. 4, д) показывает, что по сравнению с охлаждением со скоростью $V_{\text{охл}}=66^\circ\text{C}/\text{мин}$, при скорости $V_{\text{охл}}=49^\circ\text{C}/\text{мин}$ количество таких частиц увеличивается.

При наиболее медленном охлаждении с $V_{\text{охл}}=5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$ распределение упрочняющей фазы по размеру носит бимодальный характер. В структуре присутствуют γ' -частицы различного типа: отдельные кубические частицы, более крупные частицы сложной формы октокубического или октодендритного типа (обозначены 1 и 2 на рис. 4, з).

Независимо от скорости охлаждения в областях между вторичными частицами видны очень мелкие, размером несколько нанометров, частицы третичной γ' -фазы, которые формируются в жаропрочных никелевых сплавах на более поздних стадиях охлаждения [14].

При последующем двухступенчатом старении при температурах 850 и 760°C происходит изменение размера и морфологии γ' -частиц, сформировавшихся в процессе закалки. Микроструктура образцов после старения и распределение частиц γ' -фазы по размеру представлены на рис. 5, средний размер частиц приведен в табл. 4.

Во всех случаях средний размер частиц γ' -фазы после старения увеличивается, при этом морфология до скорости охлаждения $\sim 66,3^\circ\text{C}/\text{мин}$ не меняется – частицы сохраняют форму, сформировавшуюся после закалки. При относительно низкой скорости охлаждения $49,3^\circ\text{C}/\text{мин}$ морфология частиц начинает приобретать более сложную октокубическую форму (рис. 5, в). При наиболее мед-

ленном охлаждении с $V_{\text{охл}}=5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$ вторичная γ' -фаза растет в меньшей степени – характер распределения и морфология частиц по сравнению с закаленным состоянием заметно не меняется (рис. 5, з).

Наблюдаемое изменение размера и морфологии вторичных частиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД в зависимости от скорости охлаждения при закалке характерны для этого класса материалов. При быстром охлаждении жаропрочных никелевых сплавов степень пересыщения γ -твердого раствора резко увеличивается, что приводит к одновременному зарождению большого количества вторичных γ' -частиц, при этом их рост за счет диффузии γ' -образующих элементов подавляется из-за высокой скорости охлаждения. При низких скоростях охлаждения степень пересыщения γ -матрицы ниже, что приводит к образованию меньшего количества более крупных частиц, которые в процессе охлаждения растут за счет диффузии химических элементов из твердого раствора и растворения соседних более мелких частиц. В процессе дальнейшего охлаждения степень пересыщения твердого раствора вновь увеличивается, что приводит к образованию третичных частиц γ' -фазы. Их размер значительно меньше, поскольку количества γ' -образующих элементов в твердом растворе уже недостаточны для роста этих частиц [14]. Изменение формы вторичных частиц при охлаждении обусловлено соотношением энергии межфазных границ и упругой энергией, величина которой зависит от размерного несоответствия решеток γ'/γ [13].

Изменение размера $\gamma'_{\text{вт}}$ -частиц в зависимости от скорости охлаждения сплава ВЖ175-ИД в закаленном состоянии и после старения подчиняется степенной функции (рис. 6). Видно, что средний размер частиц после закалки и полной термической обработки, включающей двухступенчатое старение, явным образом зависит от скорости охлаждения при закалке. Необходимо отметить, что для наиболее медленного варианта закалки со скоростью $5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$ размер фазы после двухступенчатого старения по сравнению с закаленным состоянием увеличился незначительно (синий незаштрихованный маркер на рис. 6). Это связано с тем, что при столь медленном охлаждении γ -твердый раствор после закалки сильно обеднен γ' -образующими элементами и при последующем

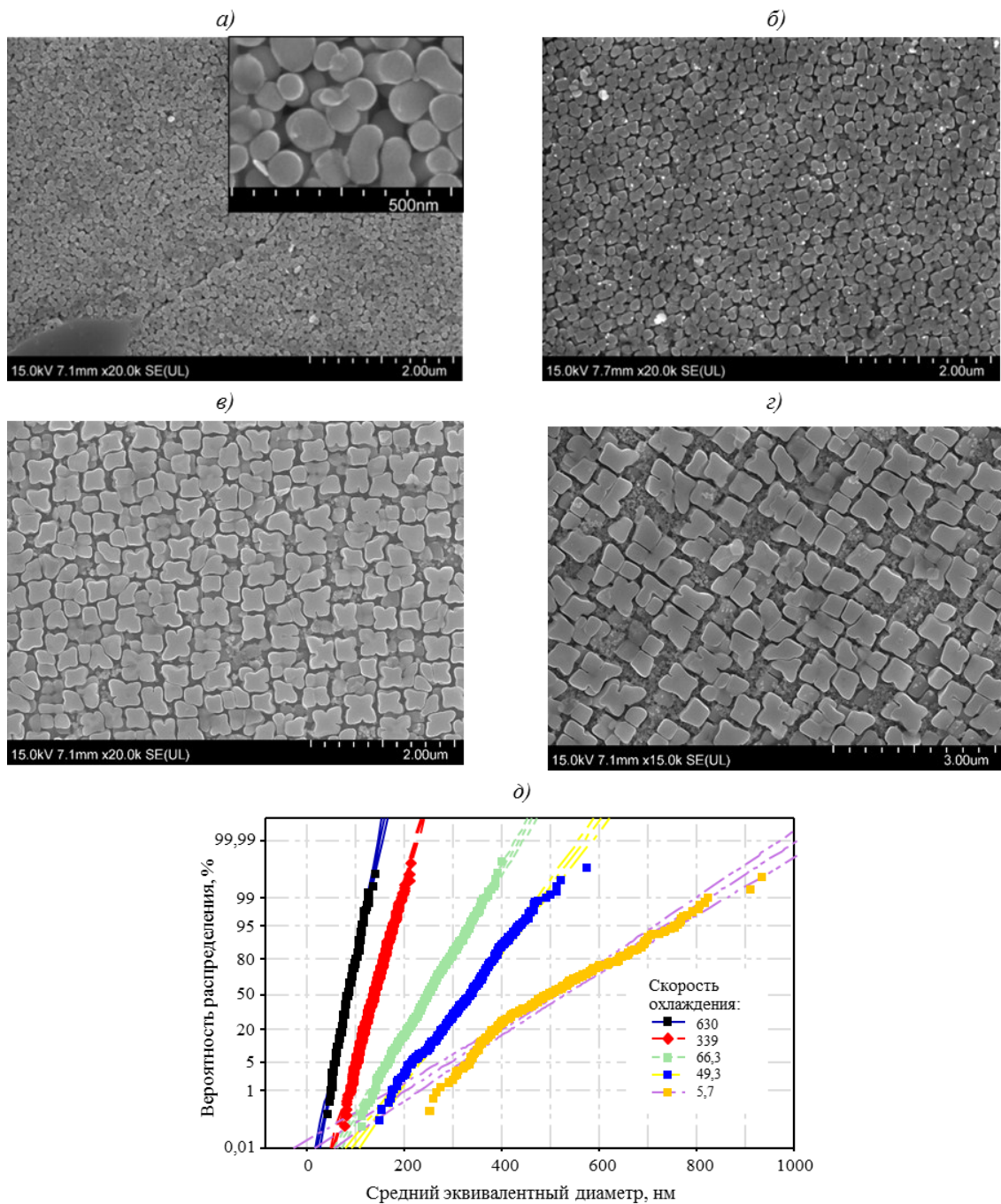


Рис. 5. Вторичные γ' -частицы в сплаве ВЖ175-ИД после закалки и двухступенчатого старения: а – закалка в масле с $V_{\text{охл}}=630^\circ\text{C}/\text{мин}$; б – закалка под вентилятором с $V_{\text{охл}}=245^\circ\text{C}/\text{мин}$; в – закалка на воздухе с $V_{\text{охл}}=49^\circ\text{C}/\text{мин}$; г – охлаждение с печью с $V_{\text{охл}}=5,7^\circ\text{C}/\text{мин}$; д – распределение частиц γ' -фазы по размеру

Таблица 4

Средний размер γ' -частицы ($D_{\text{ср.экв}\gamma'}$) в сплаве ВЖ175-ИД после закалки и двухступенчатого старения

Скорость охлаждения, $^\circ\text{C}/\text{мин}$	$D_{\text{ср.экв}\gamma'}$, нм	СКО
630	86,7	17,23
339	139,4	23,06
66,3	250	50,04
49,3	332	64,07
25,6	413,6	125,4
5,7	452,8	133

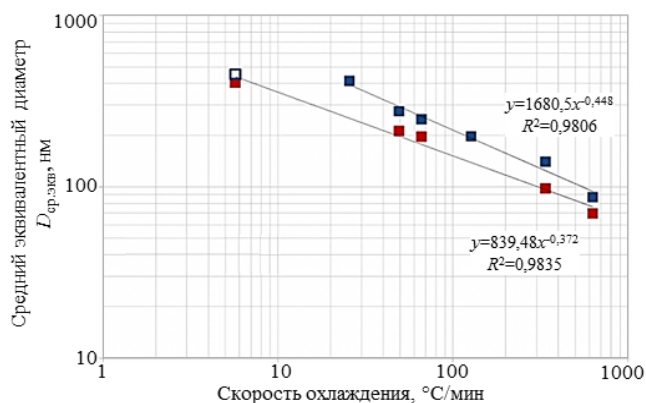


Рис. 6. Зависимость размера вторичных γ' -частиц в сплаве ВЖ175 от скорости охлаждения при закалке (■) и старении (■)

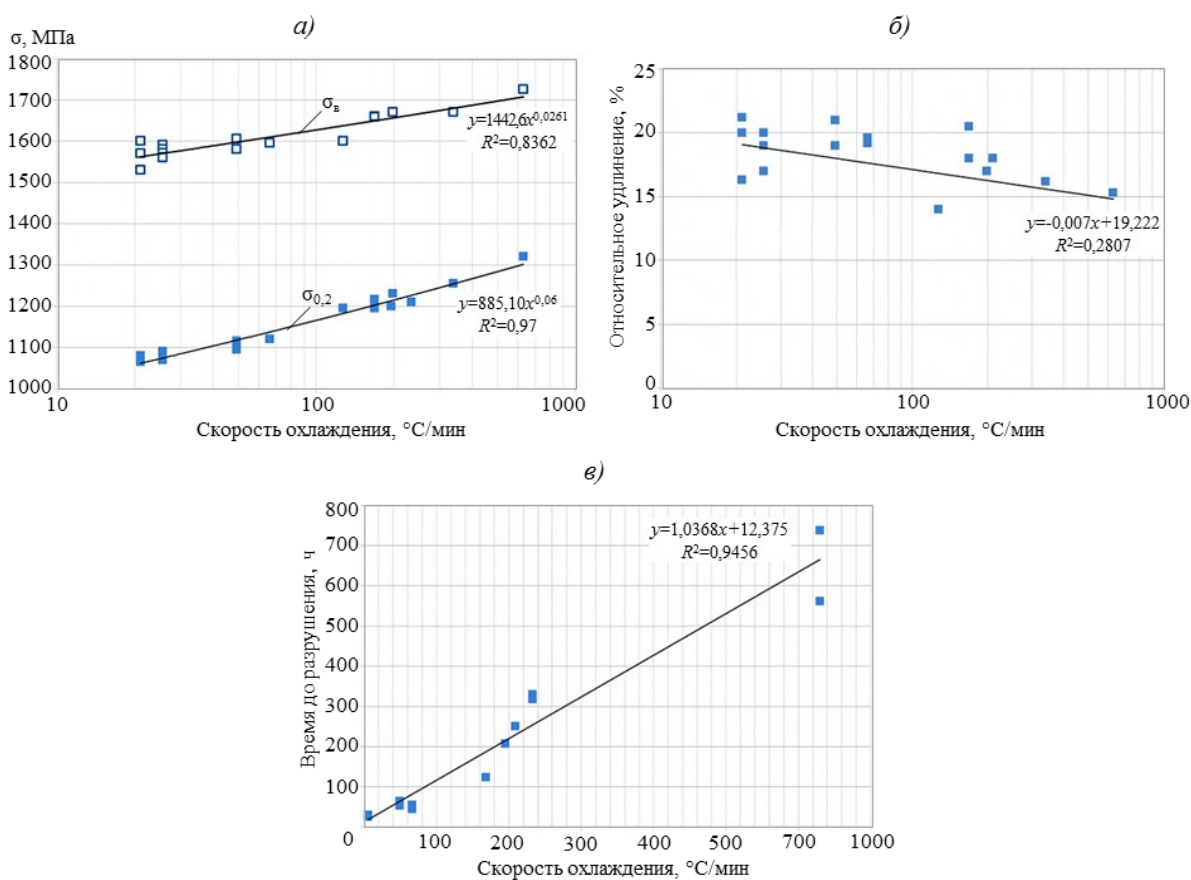


Рис. 7. Зависимость пределов прочности и текучести (а), относительного удлинения (б) и длительной прочности (е) сплава ВЖ175 от скорости охлаждения при закалке

старении их количества недостаточно для заметного роста частиц, поэтому при построении зависимости $D_{ср.экв}$ от скорости охлаждения это значение не учитывалось.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет взаимосвязь механических свойств сплава ВЖ175-ИД со скоростью охлаждения. Зависимости пределов прочности и текучести, относительного удлинения и длительной прочности от скорости охлаждения представлены на рис. 7.

Из полученных данных видно, что предел текучести является наиболее чувствительной характеристикой к скорости охлаждения (рис. 7, а), его значения меняются в достаточно широком интервале – от ~1065 до ~1320 МПа.

Скорость охлаждения также сильно влияет на время до разрушения при испытаниях на длительную прочность при температуре 650°C и напряжении 1050 МПа, значения которого различаются в несколько раз (рис. 7, е).

Предел прочности при растяжении зависит от скорости охлаждения в меньшей степени, изменение значений находится в более узком интервале, чем у предела текучести (рис. 7, а). Зависимость пластичности сплава ВЖ175-ИД от скорости охлаждения выражена слабо (рис. 7, б).

Заключения

В сплаве ВЖ175-ИД наиболее интенсивное выделение вторичных частиц γ' -фазы при закалке в двухфазной области происходит в интервале температур 1145→1000°C; размер вторичных ча-

стиц γ' -фазы зависит от скорости охлаждения при закалке в этом же интервале температур.

Наибольшее влияние скорость закалки оказывает на предел текучести и длительную прочность сплава ВЖ175-ИД.

Для получения в изделиях из сплава ВЖ175-ИД гарантированного уровня свойств – $\sigma_b \geq 1570$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 1175$ МПа и времени до разрушения более 100 ч при испытаниях на длительную прочность при температуре 650°C и $\sigma = 1050$ МПа – скорость охлаждения при закалке из двухфазной области должна составлять не менее 115°C/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
2. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) // Материаловедение. 2010. №7. С. 24–28.
4. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Антонова О.С. Малоцикловая усталость при заданной деформации жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-1-1.
5. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Чабина Е.Б. Оценка структурно-фазовой стабильности жаропрочного сплава ВЖ175 после термической обработки и имитаций наработок при рабочей температуре // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №7 (55). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-5-5.
6. Каблов Е.Н., Алексеев А.А. Физика жаропрочности гетерогенных сплавов // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 44–55.
7. Kozar R.W., Suzuki A., Milligan W.W. et al. Strengthening Mechanisms in Polycrystalline Multimodal Nickel-Base Superalloys // Metallurgical and Materials Transactions A. 2009. Vol. 40. Issue 7. P. 1588–1603.
8. Groh J.R. Effect of cooling rate from solution heat treatment on Waspaloy microstructure and properties // Superalloys 1996. The Minerals, Metals & Materials Society, 1996. P. 621–626.
9. Mao J., Chang K.M., Yang W. et al. Cooling precipitation and strengthening study in powder metallurgy superalloy Rene88DT // Materials Science and Engineering A. 2002. Vol. 332. P. 318–329.
10. Bhowal P.R., Wright E.F., Raymond E.L. Effects of Cooling Rate and Morphology on Creep and Stress-Rupture Properties of a Powder Metallurgy Superalloy // Metallurgical Transactions A. 1990. Vol. 21A. Issue 6. P. 1709–1717.
11. Jackson M.P., Reed R.C. Heat treatment of UDIMET 720Li: the effect of microstructure on properties // Materials Science and Engineering A. 1999. Vol. 259. Issue 1. P. 85–97.
12. Gabb T.P., Gayda J., Telesman J., Garg A. The effects of heat treatment and microstructure variations on disk superalloy properties at high temperature. URL: <https://www.researchgate.net> (дата обращения: 26.11.2018). DOI: 10.7449/2008/Superalloys_2008_121_130.
13. Grosdidier T., Hazotte A., Simon A. Precipitation and dissolution processes in γ/γ' single crystal nickel-based superalloys // Materials Science and Engineering A. 1998. Vol. 256. Issue 1–2. P. 183–196.
14. Mao J., Chang K.M., Yang W. et al. Cooling precipitation and strengthening study in powder metallurgy superalloy U720LI // Metallurgical and materials transaction A. 2001. Vol. 32. Issue 10. P. 2441–2452.
15. Furrer D.U. γ' formation in superalloy U720LI // Scripta Materialia. 1999. Vol. 40. No. 11. P. 1215–1220.
16. Perruta M., Locq D. γ' precipitation kinetics in the powder metallurgy superalloy N19 and influence of the precipitation latent heat. URL: <https://www.matec-conferences.org> (дата обращения 26.11.2018). DOI: 10.1051/mateconf/20141409004.
17. Masoumi F., Shahriari D., Jahazi M. et al. Kinetics and Mechanisms of γ' Reprecipitation in a Ni-based Superalloy. URL: <http://www.nature.com/scientificreports> (дата обращения: 25.11.2018). DOI: 10.1038/srep28650.
18. Mitchell R.J., Hardy M.C., Preuss M., Tin S. Development of γ' morphology in P/M rotor disc alloys during heat treatment. URL: <https://www.researchgate.net> (дата обращения: 26.11.2018). DOI: 10.7449/2004/Superalloys_2004_361_370.
19. Mitchell R.J., Preuss M., Tin S., Hardy M.C. The influence of cooling rate from temperatures above the γ' solvus on morphology, mismatch and hardness in advanced polycrystalline nickel-base superalloys // Materials Science and Engineering A. 2008. Vol. 473. Issue 1–2. P. 158–165.

20. Le Baillif P., Lamesle P., Delagnes D. et al. Influence of the quenching rate and step-wise cooling temperatures on microstructural and tensile properties of PER72 Ni-based superalloy // <https://www.matec-conferences.org> (дата обращения: 26.11.2018). DOI: 10.1051/mateconf/20141421002.
21. Schirra J.J., Reynolds P.L., Huron E.S., Bain K.R., Mourer D.P. Effect of microstructure (and heat treatment) on the 649°C properties of advanced P/M superalloy disk materials // *Superalloys 2004. The Minerals, Metals & Materials Society*, 2004. P. 341–350.
22. Gabb T.P., Garg A., Ellis D.L., O'Connor K.M. Detailed Microstructural Characterization of the Disk Alloy ME3. URL: <https://ntrs.nasa.gov> (дата обращения: 26.11.2018).
23. Волков А.М., Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Исследование процессов нагрева и охлаждения при закалке крупногабаритных заготовок дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2013. №2. С. 69–75.
24. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
25. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Сидоров С.А., Бубнов М.В. Изготовление крупногабаритных штамповок дисков ГТД из слитков промышленного производства $\text{Æ}320$ мм сплава ЭК151-ИД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №6 (54). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.