



УДК 669.245.018.44:629.7

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ  
НИКЕЛЕВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО СВАРИВАЕМОГО  
СПЛАВА ВЖ172**

И.С. Мазалов

Е.В. Филонова

Б.С. Ломберг

*доктор технических наук*

**Декабрь 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№12, 2013 г.

УДК 669.245.018.44:629.7

*И.С. Мазалов, Е.В. Филонова, Б.С. Ломберг*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ НИКЕЛЕВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО СВАРИВАЕМОГО СПЛАВА ВЖ172**

*Представлены результаты исследований структуры твердого раствора и фазовых составляющих сплава ВЖ172 в процессе горячей и холодной деформации, а также при термической обработке заготовок деталей. Показаны особенности формирования структуры в зависимости от режимов процессов деформации и термической обработки.*

**Ключевые слова:** *никелевый жаропрочный сплав, горячая деформация, холодная прокатка, термическая обработка, микроструктура.*

*I.S. Mazalov, E.V. Filonova, B.S. Lomborg*

## **FORMATION OF MICROSTRUCTURE OF NICKEL WELDABLE VGH172 SUPERALLOY IN PROCESS OF DEFORMATION AND HEAT TREATMENT OF SEMI-FINISHED PRODUCTS**

*The results of researches of solid solution and phase components structure of alloy VGH172 are provided in the course of hot and cold deformation, and also after heat treatment in processing of semi-finished products. Features of forming of structure depending on modes of processes are shown.*

**Keywords:** *nickel superalloy, welding, hot deformation, cold-rolling process, heat treatment, microstructure.*

Развитие авиации и авиационного двигателестроения как в России, так и за рубежом, во многом обеспечивается прогрессом в области создания новых материалов и технологий их переработки [1]. Новые процессы термомеханической обработки [2, 3], разработанные с применением компьютерного моделирования и внедренные в производстве ФГУП «ВИАМ», обеспечивают формирование регламентированной структуры и, как следствие, стабильные механические характеристики заготовок деталей газотур-

бинных двигателей (ГТД) из жаропрочных никелевых сплавов [4]. Внедрение новых свариваемых жаропрочных материалов, а также процессов изготовления и сварки заготовок деталей позволит повысить ресурс и надежность конструкции ГТД. Эти задачи могут быть достигнуты благодаря повышенным удельным характеристикам новых материалов, увеличению температуры их работы и, кроме того, благодаря конструкциям на основе неразъемных сварных соединений, обеспечивающих снижение массы узлов [5]. Такие материалы должны сочетать в себе высокие характеристики прочности и жаропрочности при сохранении высоких показателей технологической пластичности и свариваемости.

Для изготовления сварных деталей корпуса и силовых конструкций статора горячего тракта газотурбинных двигателей – корпусов, опор, стоек и других – применяются жаропрочные деформируемые сплавы с рабочей температурой до 900°C. Для производства корпусных деталей используют полуфабрикаты в виде холодного и горячего проката, а также раскатные кольцевые заготовки. Наибольшее распространение получили дисперсионно-твердеющие сплавы на никелевой основе, обладающие сочетанием высокого уровня механических свойств, высокой пластичностью при получении полуфабрикатов и заготовок деталей методами горячей и холодной деформации, а также хорошей свариваемостью. Упрочнение таких материалов, помимо карбидных фаз, обеспечивается выделением в твердом растворе мелкодисперсной интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы на основе соединения  $Ni_3Al$ , объемная доля которой обычно находится в пределах от 15 до 35%, свыше – деформация и сварка становятся затруднительными [6]. Кроме того, для обеспечения качественного сварного соединения и снижения риска растрескивания сварных узлов при последующей термической обработке, необходимо обеспечить однородную регламентированную по размеру зеренную структуру в заготовках деталей.

Никелевый высокопрочный свариваемый сплав ВЖ172 предназначен для изготовления нагруженных статорных деталей авиационных газотурбинных двигателей, таких как корпуса камеры сгорания и турбины, впервые паспортизован в виде холоднокатаного листа. Сплав ВЖ172 превосходит серийные сплавы ЭП693, ЭП718, ЭП708, Inconel 718 аналогичного назначения по кратковременной и длительной прочности в диапазоне рабочих температур 600–800°C [7, 8]. При этом сплав обладает хорошей свариваемостью и высокой пластичностью при горячей и холодной деформации, что обеспечивает возможность получения различных полуфабрикатов и сварных узлов методами аргонодуговой и электронно-лучевой сварки.

Целью данного исследования является анализ и выявление закономерностей формирования структуры в заготовках деталей, полученных из сплава ВЖ172 в процессе горячей, холодной деформации и термической обработки.

### **Материалы и методика исследований**

Листовые полуфабрикаты и заготовки деталей – холоднокатаный и горячекатаный прокат – из свариваемых жаропрочных никелевых сплавов получают многоступенчатой деформацией слитка вакуумно-индукционной выплавки (ВИ). Для массивных заготовок, таких как раскатные кольца, изготавливаемых в процессе многостадийного передела слитка с многократной сменой направления деформирования, используют металл электродугового (ИД) или электрошлакового (ЭШ) переплава, обладающий повышенной чистотой по примесям и газам, а также более однородным химическим составом, что существенно снижает вероятность растрескивания и брака заготовок [9].

Для исследования структуры сплава ВЖ172 на различных стадиях передела изготавливали микрошлифы из литой цилиндрической заготовки, полученной отливкой в керамическую форму по выплавляемым моделям из металла вакуумно-индукционной выплавки. Структуру сплава в состоянии после горячей деформации исследовали на металле раскатного кольца сечением 90×120 мм, полученного в промышленных условиях из слитка электродугового переплава. Технология изготовления раскатного кольца включает в себя ковку слитка с получением поковки и мерной заготовки из нее. Заготовку под раскатку кольца получают осадкой мерной заготовки на прессе за 2–3 перехода с прошивкой центрального отверстия. Расковку по диаметру осаженной заготовки проводят на молотах или ковочных машинах, далее проводят раскатку на кольцепрокатных станах за несколько переходов до требуемого диаметра. На каждой стадии (выносе) горячего передела проводят промежуточный подогрев для снятия напряжений деформации и обеспечения оптимальной температуры заготовки. Исследовалась структура подката сечением 12 мм и холоднокатаного листа толщиной 1,5 мм, изготовленных многостадийной прокаткой кованой заготовки-сутунки из слитка вакуумно-индукционной выплавки. Получение листовых полуфабрикатов характеризуется вытяжкой металла в одном направлении прокатки кованой заготовки и связанной с этим некоторой текстурой деформации, что особенно характерно для холоднокатаного листа [10].

Структуру сплава в различных состояниях исследовали методом оптической микроскопии на микроскопе Olympus GX51 с измерением и оценкой распределения размера зерна в программе Image Expert Pro 3, а также методом растровой электронной мик-

роскопии на приборе JSM-6490LV с системой INCA для локального микрорентгено-спектрального определения химического состава.

### Результаты исследований

Жаропрочный свариваемый сплав ВЖ172 имеет сложный многокомпонентный химический состав и отличается значительным содержанием ниобия (до 5%) и циркония (до 1%) [11].

В литом состоянии при равноосной кристаллизации сплав имеет дендритную структуру твердого  $\gamma$ -раствора с ГЦК решеткой (рис. 1, а, б), характерную для никелевых сплавов данного класса, с ограниченным содержанием алюминия и титана. В межосном пространстве при затвердевании слитка кристаллизуется первичная эвтектическая фаза в виде скопления частиц неправильной формы, размером 15–20 мкм. Данная фаза ( $\gamma'_3$ ) типа  $Ni_3Al$  имеет структуру ГЦК и содержит значительное количество циркония (12–20% по массе) и ниобия (10–15% по массе). Кроме того, в межосной области присутствуют карбидная фаза типа  $(Nb, Ti)C$  и интерметаллид на основе циркония  $(Ni_7Zr_2)^*$ . Карбидная эвтектика имеет неправильную форму, реже – одиночные частицы в виде куба или октаэдра, размерами 5–15 мкм. В плавках, содержащих >1,5% углерода, морфология карбидных частиц приобретает вид пластин и иероглифа (рис. 1, в) [12]. Известно, что ликвация по химическому составу высоколегированных деформируемых никелевых сплавов, вызванная выделившейся при кристаллизации легкоплавкой эвтектикой, увеличивает вероятность возникновения дефектов при деформации слитка, приводит к возникновению неоднородности структуры по сечению полуфабриката и, как следствие, нестабильности механических свойств в заготовке детали [13]. Для устранения эффекта ликвации применяют гомогенизирующий отжиг слитка, а также отжиг после первой стадии деформации слитка, в результате которых первичная эвтектика интерметаллидной фазы должна быть частично либо полностью растворена.

---

\* По результатам микрорентгеноспектрального и фазового анализа, выполненного к.т.н. Г.И. Морозовой, к.т.н. Е.Б. Чабиной, к.т.н. Е.А. Давыдовой, Н.А. Колмыковой, Р.М. Дворецковым.

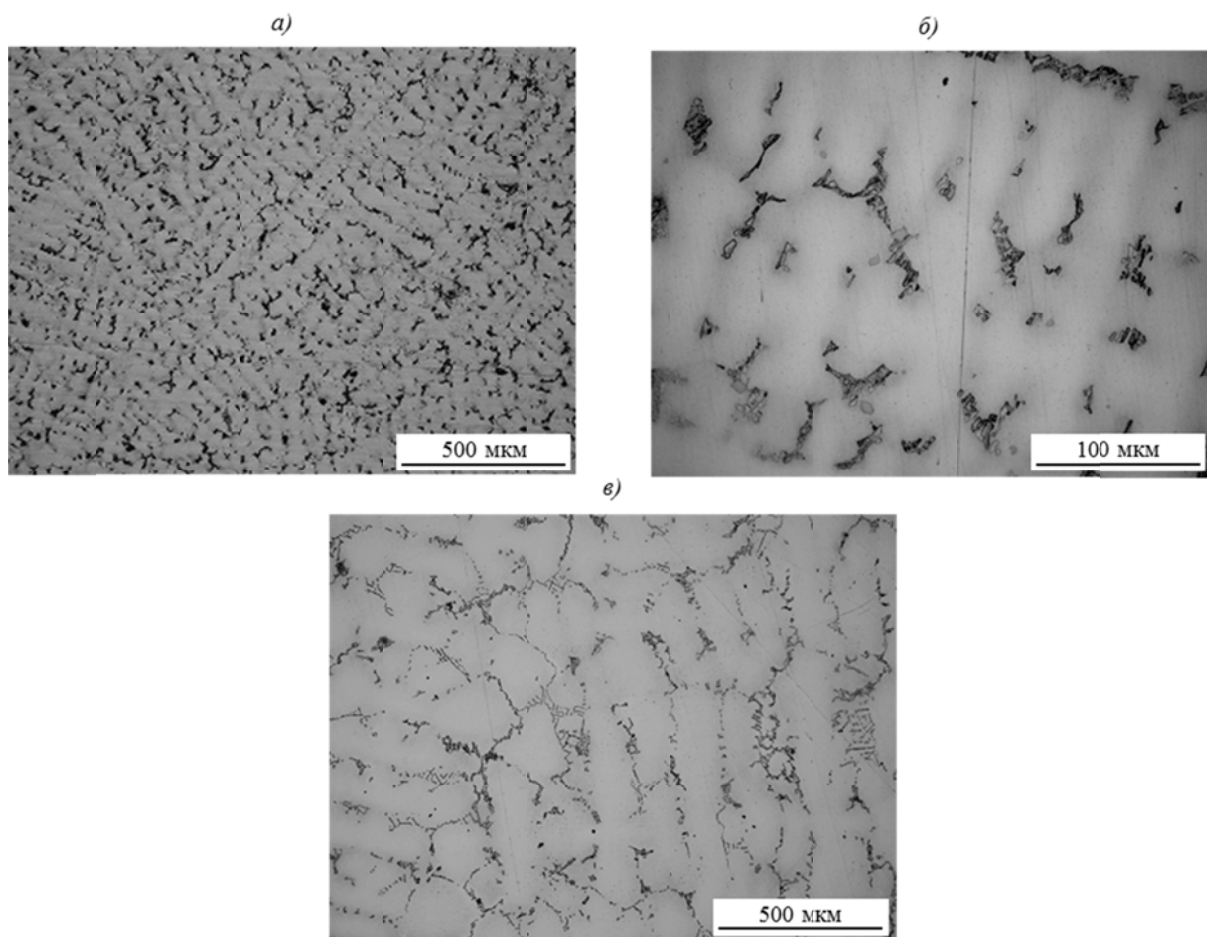


Рисунок 1. Микроструктура (*a, в* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$ ) литой заготовки из сплава ВЖ172 с содержанием углерода до 1% (по массе) (*a, б*) и с 1,5% (по массе) С (*в*)

В сплаве ВЖ172 эвтектическая фаза  $\gamma'_3$  является тугоплавкой, с температурой начала плавления  $T_{\gamma'_3} \approx 1190^\circ\text{C}^*$ . При нагреве свыше этой температуры происходит оплавление по границам глобулярных выделений эвтектики. Однако опыт промышленного производства показал, что предварительный отжиг слитка при температурах на 40–50 $^\circ\text{C}$  ниже температуры  $T_{\gamma'_3}$  повышает пластичность сплава, позволяя реализовать степень разовой деформации массивного слитка 20–25% без возникновения поверхностных дефектов. Таким образом, первичная эвтектическая фаза, выделяющаяся при кристаллизации, является нерастворимой структурной составляющей сплава, оказывающей влияние на формирование структуры при последующей деформации.

---

\* По данным дифференциального термического анализа.

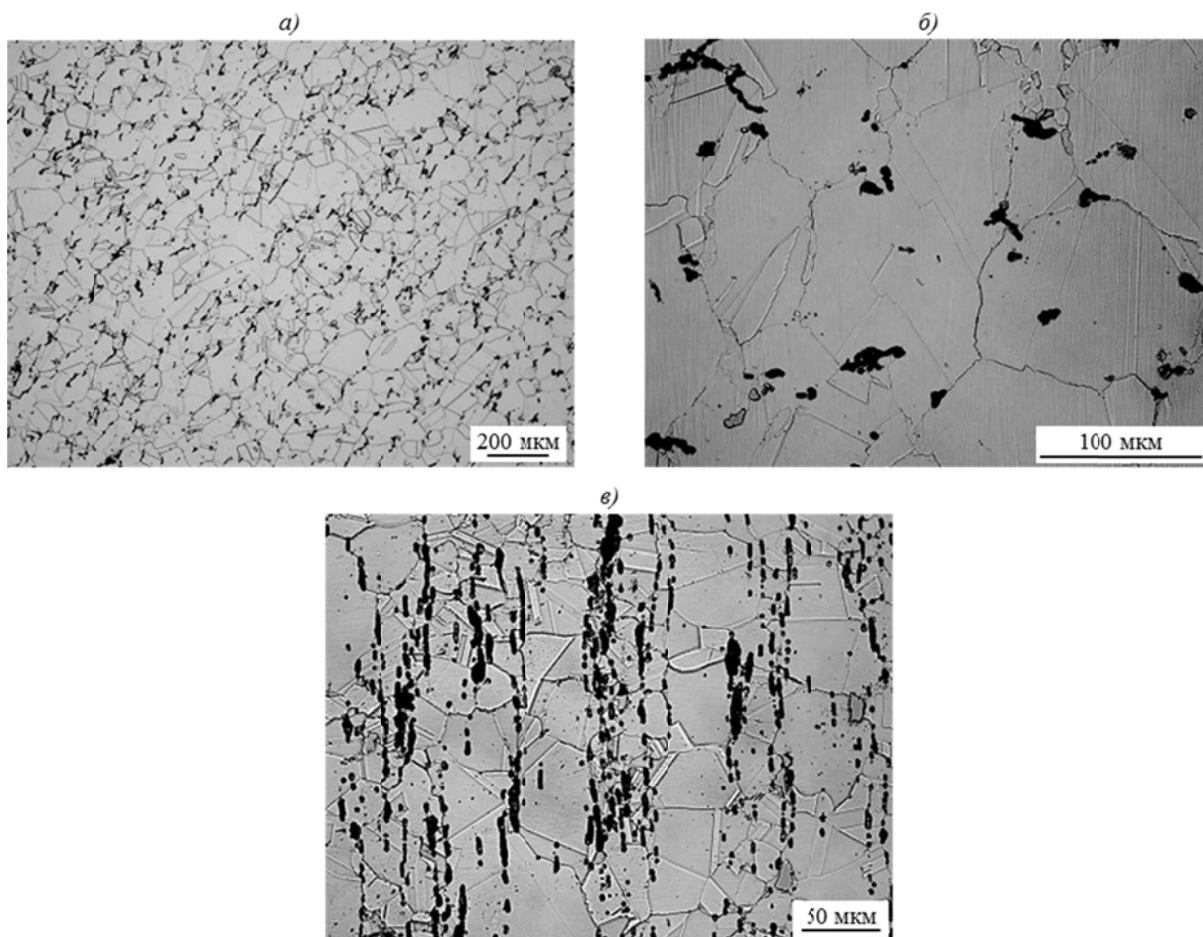


Рисунок 2. Микроструктура горячедеформированного раскатного кольца (*a* –  $\times 100$ ; *b* –  $\times 500$ ) и горячего подката (*c* –  $\times 500$ )

При многоступенчатой горячей деформации литая структура рекристаллизуется с образованием зеренной структуры (рис. 2, *a*). Скопления частиц эвтектики дробятся в процессе деформации и распределяются по границам, вероятно, препятствуя росту зерна при динамической рекристаллизации. Зерна твердого раствора, границы которых свободны от выделений первичной эвтектической фазы, имеют укрупненный размер, в сравнении с зернами, декорированными по границам частицами эвтектики и карбидов (рис. 2, *b*). Частицы эвтектики располагаются на границах зерен строчечно, преимущественно в направлении пластического течения металла при деформации, что особенно характерно для листовых полуфабрикатов. Размер выделений находится в пределах 2–10 мкм, однако при химическом травлении фаза интенсивно вытравливается и, при отсутствии ее видимых границ, на микрошлифе видны непрерывные строчки (рис. 2, *c*). Карбидная фаза типа MC приобретает морфологию кубов или многоугольников с гранями правильной или сглаженной формы (рис. 3), размер частиц – от 5 до 20 мкм. Частицы карбидной фазы могут отличаться соотношением титана и ниобия, а также нали-

чием некоторого количества азота. В процессе горячей деформации карбидная фаза остается стабильной, не претерпевая фазовых превращений. Количество карбидной фазы в сплаве остается неизменным во всех технологических состояниях и находится на уровне 0,4–0,6% (по массе)\*.

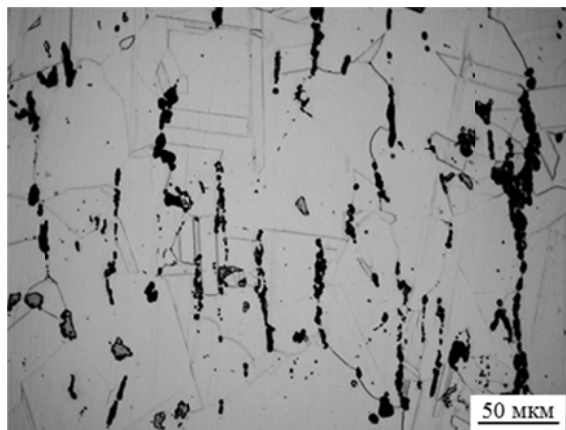


Рисунок 3. Морфология ( $\times 500$ ) карбидных фаз и интерметаллидной эвтектики

Проведена оценка распределения размеров микрзерна по баллам в соответствии с ГОСТ 5639 образцов из раскатного кольца и горячего подката (рис. 4). Массивная заготовка раскатного кольца вследствие сложной схемы деформации с разовой степенью 20–25% имеет в среднем крупное зерно (4–6 балла). Горячекатаный подкат толщиной 12 мм, прокатанный в одном направлении с разовой степенью деформации 30–35%, имеет более мелкую и однородную структуру (5–6 балла).

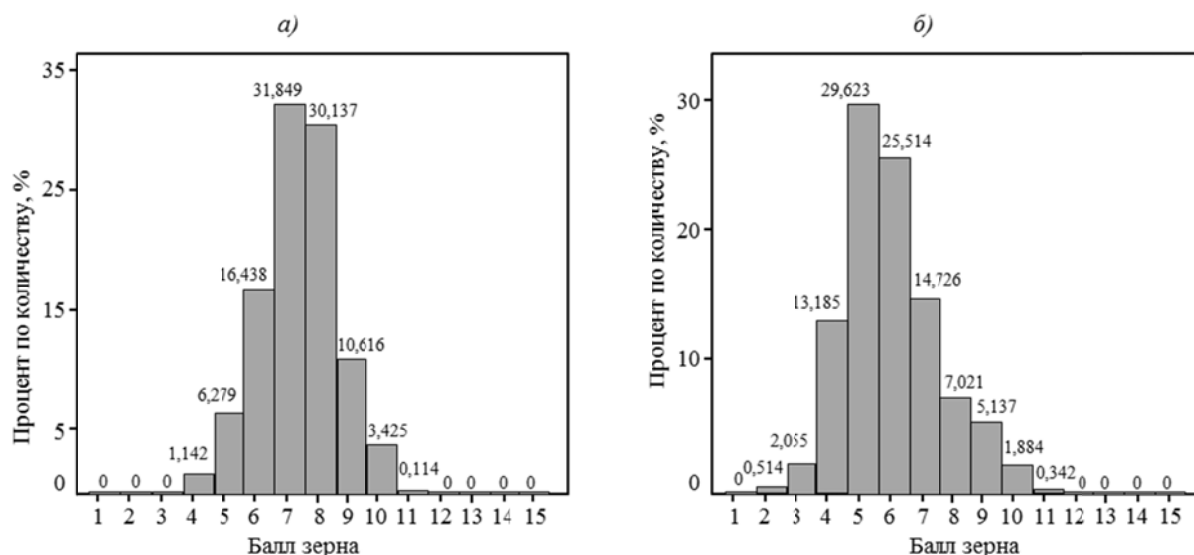


Рисунок 4. Распределение зерна по размеру в горячекатаном подкате толщиной 12 мм (а) и в раскатном кольце сечением 120×90 мм (б)

\* По результатам фазового анализа.

При холодной прокатке листовых заготовок сплава ВЖ172 формируется зерно с текстурой в направлении проката (рис. 5, *а*). Последующий отжиг приводит к формированию полностью рекристаллизованной структуры, кроме того, происходит процесс двойникования (рис. 5, *б*, *в*).

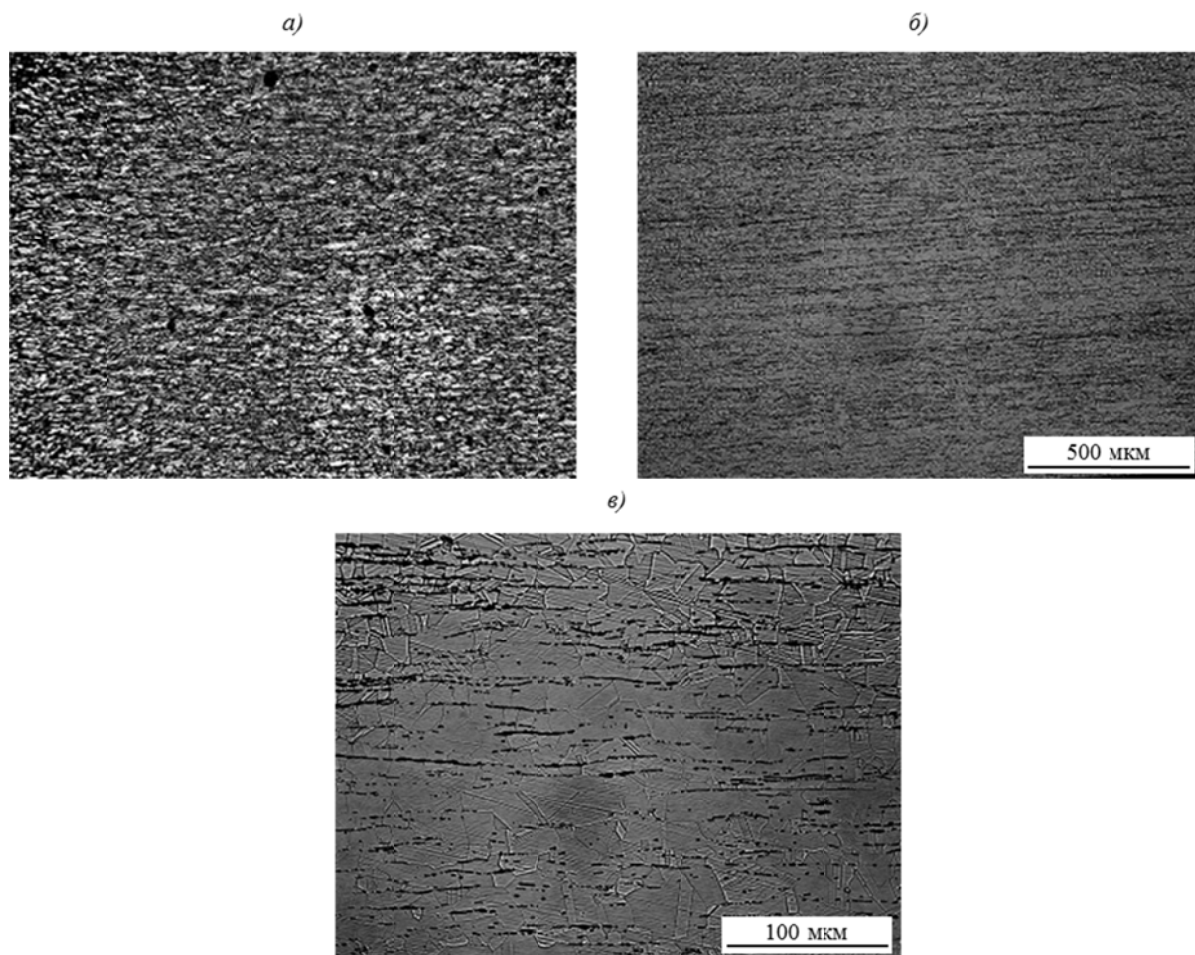


Рисунок 5. Микроструктура (*а*, *б* –  $\times 100$ ; *в* –  $\times 500$ ) холоднокатаного листа без термической обработки (*а*) и после отжига (*б*, *в*)

Рост зерен в процессе собирательной рекристаллизации при отжиге сдерживается наличием на границах выделений эвтектической фазы и карбидов. В связи с тем, что распределение первичной эвтектики в листовом прокате носит строчечный характер, могут образовываться зоны в виде полос зерен с границами, свободными от выделений фаз. В этих случаях при отжиге образуются строчки более крупного зерна, что особенно выражено в центре сечения проката, где вытяжка при деформации минимальна. Для компенсации этого явления предложено увеличить температуру отжига на 20–40°C, что привело к выравниванию структуры при общем незначительном росте зерна. Кроме того, при повышении температуры и продолжительности отжига более полно снимается наклеп холодной прокатки, что особенно важно для обеспечения пластиче-

ских характеристик металла с целью последующего получения деталей холодной формовкой из листа. Повышение температуры отжига  $>1120^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению степени собирательной рекристаллизации и формированию равномерной крупнозернистой структуры, что снижает характеристики кратковременной прочности и свариваемости сплава.

### Выводы

1. Структурной особенностью сплава ВЖ172 является наличие стабильной тугоплавкой эвтектики интерметаллидной фазы типа  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (Zr, Nb). В процессе деформации и термической обработки данная фаза сдерживает рост зерен, не приводя к охрупчиванию сплава.

2. При неравномерной степени деформации по сечению полуфабриката, в структуре сплава могут присутствовать границы зерен, свободные от выделений частиц первичной эвтектики, что может являться причиной неоднородной рекристаллизации при деформации и отжиге.

3. Карбидная фаза типа MC, присутствующая в сплаве ВЖ172, является структурно стабильной и не претерпевает фазовых превращений на всех стадиях получения заготовки.

4. Для обеспечения однородной структуры заготовки детали из сплава ВЖ172, необходим выбор оптимального режима горячей и холодной деформации и термической обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 12–13.
2. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 141–147.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.

4. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 21–22.
5. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
6. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: Пер. с англ. Книга 2. Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К. М.: Металлургия. 1995. С. 281–282.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. Спец. вып. С. 98–103.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 55–56.
9. Кабанов И.В., Ильинский А.И., Топилина Т.А., Сидорина Т.Н., Щербаков А.И., Мазалов И.С. Перспективные способы выплавки высокожаропрочного сплава на Ni–Co–Cr основе с высоким содержанием ниобия и циркония методами ИД и ИШ //Бюллетень Черная металлургия. 2012. №8. С. 28–32.
10. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Перспективные жаропрочные деформируемые никелевые сплавы и технологии их производства /В сб. Перспективы и направления развития жаропрочных сплавов и сталей. Технологии их изготовления и переработки: Докл. науч.-технич. семинара. М.: ВИАМ. 2012.
11. Мазалов И.С., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М. Особенности структурно-фазового состава новых жаропрочных свариваемых сплавов на основе никеля для статорных деталей горячего тракта ГТД /В сб. Современные металлические материалы и технологии (СММТ’2011): Тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. СПб.: Изд-во политехнич. ун-та. 2011. С. 516.
12. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов //МиТОМ. 2012. №12. С. 54–56.
13. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М. Структура современных деформируемых никелевых сплавов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. Т. 6. С. 22–27.

## Reference list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 12–13.
2. Ospennikova O.G., Bubnov M.V., Kapitanenko D.V. Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem [Computer simulation of plastic working of metallic materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 141–147.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Kompleksnaya innovatsionnaya tehnologiya izotermicheskoy shtampovki na vozduhe v rezhime sverhplastichnosti diskov iz superzharoprochnykh splavov [Complex Innovation Technology of Isothermal Superplastic Forging of Superalloy Discs in Air Atmosphere] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 129–141.
4. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zaschitnykh i teplozaschitnykh pokrytiy [Development Strategies of Heat Resistant Alloys and Special Steels, Protective and Thermoprotective Coatings] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 21–22.
5. Shmotin Yu.N., Starkov R.Yu., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Novye materialy dlya perspektivnogo dvigatelya OAO «NPO „Saturn”» [Novel materials for the advanced engine developed by JSC «NPO „Saturn”»] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.
6. Supersplavy II. Zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok: Per. s angl. Kniga 2. [Superalloys II. High-temperature materials for aerospace and industrial power units: Translation from English Volume 2] Pod red. Simsa Ch.T., Stoloffa N.S., Hagelya U.K. M.: Metallurgiya. 1995. S. 281–282.
7. Lomborg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokozharoprochnye deformiruemyye nikelovyye splavy dlya perspektivnykh gazoturbinnyykh dvigateley i gazoturbinnyykh ustanovok [High-temperature wrought nickel alloys for advanced gas-turbine engines and gas-turbine units] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. Spets. vyp. S. 98–103.
8. Lomborg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnyye zharoprochnyye nikelovyye splavy dlya detaley gazoturbinnyykh dvigateley [High-temperature Ni-base alloys for GTE components] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 55–56.

9. Kabanov I.V., Il'inskiy A.I., Topilina T.A., Sidorina T.N., Scherbakov A.I., Mazalov I.S. Perspektivnye sposoby vyplavki vysokozharoprochnogo splava na Ni–Co–Cr osnove s vysokim sodержaniem niobiya i tsirkoniya metodami ID i ISh [Advanced practices for melting high-temperature Ni–Co–Cr-base alloys with high content of niobium and zirconium with the use of VIM-VAR and VIM-ESR methods] //Byulleten' Chernaya metallurgiya. 2012. №8. S. 28–32.
10. Letnikov M.N., Lomberg B.S., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Perspektivnye zharoprochnye deformiruemye nikelovye splavy i tehnologii ih proizvodstva [Advanced high-temperature wrought nickel alloys and technologies for their production] /V sb. Perspektivy i napravleniya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley. Tehnologii ih izgotovleniya i pererabotki: Dokl. nauch.-tehnich. seminara. M.: VIAM. 2012.
11. Mazalov I.S., Lomberg B.S., Bakradze M.M. Osobennosti strukturno-fazovogo sostava novykh zharoprochnykh svarivaemykh splavov na osnove nikelya dlya statornykh detaley goryachego trakta GTD [Special features of structural and phase composition of new heat-resistant weldable nickel-base alloys for the hot duct stator components of GTE] /V sb. Sovremennye metallicheskie materialy i tehnologii (SMMT'2011): Tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-tehnich. konf. SPb.: Izd-vo politehnich. un-ta. 2011. S. 516.
12. Morozova G.I. Kompensatsiya disbalansa legirovaniya zharoprochnykh nikelovykh splavov [Compensation of imbalance in alloying heat-resistant nickel alloys] //MiTOM. 2012. №12. S. 54–56.
13. Chabina E.B., Filonova E.V., Lomberg B.S., Bakradze M.M. Struktura sovremennykh deformiruemyykh nikelovykh splavov [Structure of modern wrought nickel alloys] //Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2012. T. 6. S. 22–27.