

21. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 464 с.

22. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация: Учеб. для вузов. М.: МИСиС. 1997. 527 с.

23. Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения: Пер. с нем. М.: Мир. 1988. 344 с.

24. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. М.: Metallurgy. 1979. 496 с.

25. Бокштейн Б.С., Есин В.А., Ларионов В.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Диффузионная модель вакансионного растворения пор в условиях газоиостатического прессования монокристалла жаропрочного сплава на никелевой основе // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 5–9.

Е.Н. КАБЛОВ, О.Г. ОСПЕННИКОВА, Б.С. ЛОМБЕРГ

КОМПЛЕКСНАЯ ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ НА ВОЗДУХЕ В РЕЖИМЕ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ ДИСКОВ ИЗ СУПЕРЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Наиболее ответственными среди комплектующих деталей как с точки зрения повышения тактико-технических параметров изделий, так и в отношении ресурса и надежности при эксплуатации являются диски турбины и компрессора.

Для достижения необходимых эксплуатационных свойств дисков из новых материалов центральными являются вопросы, связанные с разработкой инновационных технологий, обеспечивающих получение необходимого сортамента полуфабрикатов для современных и перспективных ГТД и ГТУ.

В металлургической промышленности РФ отсутствует специализированное производство дисков (диаметром до 300 мм) из труднодеформируемых высоколегированных сплавов на основе никеля и титана для малоразмерных газотурбинных двигателей (вертолетные двигатели, силовые установки, двигатели для ракетной техники и др.).

В настоящее время штамповки дисков диаметром <300 мм изготавливаются на оборудовании, предназначенном для производства крупногабаритных заготовок. Поэтому коэффициент использования дорогостоящего металла (КИМ) составляет 0,2–0,3, а штамповки имеют разнородную структуру и характеризуются нестабильным уровнем механических свойств.

Для решения важнейшей народнохозяйственной задачи обеспечения производства малоразмерных газотурбинных двигателей экономичными, высококачественными заготовками дисков из высокожаропрочных никелевых и высокопрочных титановых сплавов в ВИАМ разработан комплекс принципиально новых технологий, реализованных на созданном специализированном уникальном оборудовании для выплавки и обработки давлением, не имеющем аналогов в отечественной и зарубежной промышленности.

Разработанный технологический процесс изотермической штамповки предполагает использование в качестве исходной заготовки как серийного пресс-прутка, так и впервые в мировой практике непосредственно

мерного слитка, полученного методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК).

Для реализации данного процесса в ВИАМ разработана специальная технология производства жаропрочных сплавов [1], включающая глубокое обезуглероживание и рафинирование расплава, применение шихтовых материалов повышенной чистоты по примесям, комплексное рафинирование редкоземельными металлами, использование всех видов отходов металлургического и литейного производств жаропрочных сплавов. Технология обеспечивает ультравысокую чистоту жаропрочного сплава по примесям, достижение узких интервалов легирования, экономию дорогих и дефицитных материалов.

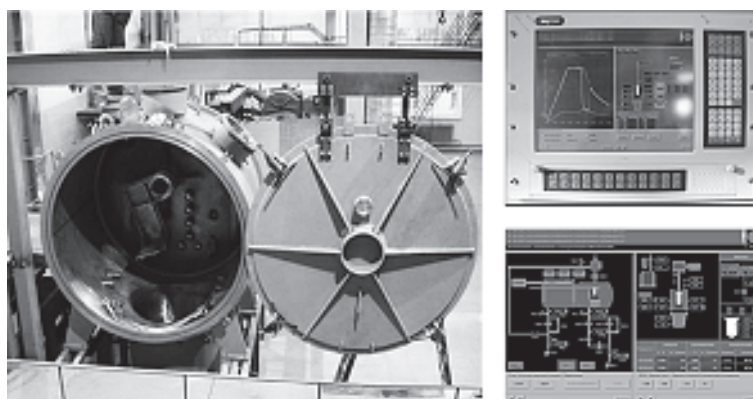


Рис. 1. Установка УВНК-10 с автоматизированной системой управления

Создана не имеющая аналогов в мировой практике высокоградиентная технология направленной кристаллизации (ВГНК) [2], для реализации которой впервые в отечественной и зарубежной практике спроектированы и изготовлены на производственной базе ВИАМ специализированные вакуумные плавильно-заливочные комплексы УВНК-14, УВНК-10 (рис. 1) с компьютерными системами управления для ВГНК заготовок из гетерофазных сплавов под деформацию. Создана также единая система компьютерного управления технологическими процессами литья заготовок.

Автоматизированные комплексы позволяют получать отливки, максимально приближенные по геометрическим размерам к заготовкам для штамповки сложнопрофильных изделий типа «диск-вал», диск переменного сечения и др. (рис. 2), что позволяет повысить коэффициент исполь-

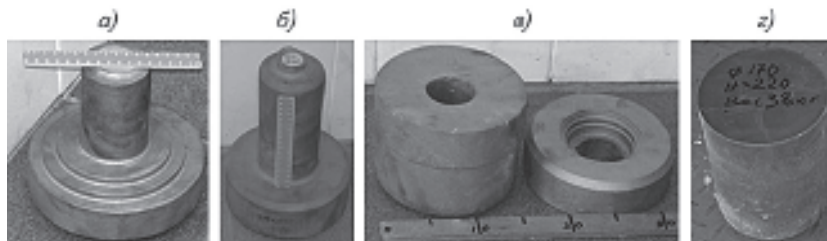


Рис. 2. Литые заготовки диска переменного сечения (а), диска с валом (б), кольцевые заготовки (в), цилиндрическая заготовка (г) из сплава ЭП975

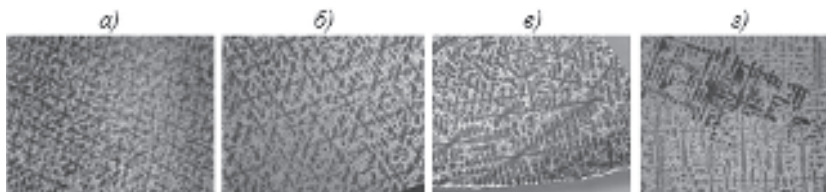


Рис. 3. Микроструктура дисковой (*а* – низ; *б* – верх) и кольцевой заготовок (*в* – низ; *г* – верх)

зования металла без потери качества, а также получить оптимальную структуру под деформацию, равномерную по всей длине слитка (рис. 3).

В отличие от применяемой за рубежом штамповки в вакууме, впервые в отечественной практике разработаны и применены высокоресурсные жаропрочные сплавы для штампов на базе литейных жаропрочных сплавов (ИШВ-2), интерметаллидного сплава (ВКНА-3) и сплава на композиционной основе Ст–Fe–Mo в порошковом и гранулированном вариантах.

Использование этих сплавов позволило обеспечить высокую стойкость штампового инструмента при серийной изотермической штамповке. Опыт работы показал, что использование сплава ИШВ-2 в качестве штампового материала при изготовлении заготовок дисков из высокожаропрочных сплавов обеспечивает получение не менее 150 штамповок (до первого ремонта штампа).

Значительное снижение стоимости штамповой оснастки достигнуто благодаря разработке экономичной технологии изготовления точных отливок штампов методом литья по выплавляемым моделям. При этом обеспечивается припуск на механическую обработку не более 5 мм на сторону, что позволяет не только экономить дорогостоящие сплавы, но и значительно снизить трудоемкость механической обработки штампов.

Разработанная технология предусматривает при изготовлении штампов использование до 85% отходов промышленных жаропрочных никелевых сплавов и 100% отходов штампового производства. Это также позволило значительно снизить затраты на подготовку производства.

Дополнительная экономия была достигнута благодаря разработке сборной конструкции штампов, при которой из высокожаропрочных сплавов изготавливались наиболее нагруженные детали штампов, остальные части – из отходов сплавов серийного производства.

Специалистами ВИАМ разработаны антиокислительные технологические высокотемпературные эмалевые покрытия для защиты деталей из жаропрочных Ni и Ti сплавов, являющиеся одновременно высокотемпературной смазкой при деформации [3]. Разработанные в ВИАМ защитные технологические покрытия позволяют производить безокислительный технологический нагрев сплавов и сталей в обычных печах вместо печей с контролируемой атмосферой, применение защитных покрытий в технологических процессах позволяет получать точные штамповки, экономить металл до 30%, электроэнергию – до 50%. Покрытия повышают стойкость штамповой оснастки в 2–3 раза.

Для изготовления покрытий создано специализированное производство фритт для нанесения покрытий, производительностью до 50 тонн в год (рис. 4).

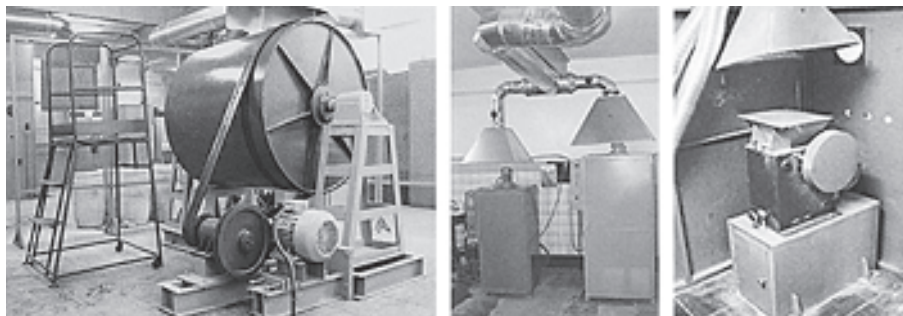


Рис. 4. Участок изготовления защитных технологических покрытий – высокотемпературных смазок

Сложные по составу дисковые сплавы в состоянии после литья имеют многофазную гетерогенную структуру, в большинстве случаев низкую пластичность и малую способность к деформации.

Обработка давлением жаропрочных никелевых сплавов связана с рядом проблем, решение которых в значительной степени определяет качество и свойства металла, выход годного. Сложность этих проблем возрастает с увеличением степени легирования сплавов и размеров слитка.

Для оптимизации параметров были проведены исследования по компьютерному моделированию процесса деформации гетерогенных жаропрочных сплавов [4]. В результате решены следующие задачи:

- управление структурой в процессе деформации;
- специальная подготовка структуры исходной заготовки;
- выбор оптимальных термомеханических параметров деформации (степень, скорость, температура и количество переходов).

Компьютерное моделирование проводилось с применением программ ТПР (расчет физических и структурно-фазовых характеристик в зависимости от химического состава сплава) и Q-Form (моделирование термомеханических параметров деформации, разработка штамповой оснастки и технологии формообразования).

Одним из эффективных инструментов для получения полуфабрикатов с регламентированной структурой является построение диаграмм структурных состояний (ДСС) сплавов, которые отражают качественные и количественные зависимости структуры от температуры и параметров деформации. Такие диаграммы позволяют прогнозировать получение необходимой структуры в зависимости от температурно-скоростных условий деформации. Варьируя основными параметрами деформации – степень, скорость, температура, – можно получить полный набор структурных состояний: начиная от горячего наклепа и до полной рекристаллизации. По литературным данным, диаграммы структурных состояний, построенные экспериментально с помощью испытаний при сжатии, правильно описывают структуры, полученные разными способами обработки давлением.

Эффективность применения метода диаграмм структурного состояния можно продемонстрировать на примере процессов многоступенчатой деформации заготовок сплава ВЖ175-ИД, для которого разовая степень деформации не должна превышать ~30%. В этих условиях формируется равномерная макро- и микроструктура штамповок и материал деформи-

руется без образования трещин. Интервал скоростей деформации выбирается на основании скорости деформирования сплава на существующих промышленных прессах. Для выбора температуры деформации исследовано структурно-фазовое состояние сплава ВЖ175-ИД после закалки с температур в интервале 1100–1180°C. Методами растровой электронной микроскопии и количественной металлографии определены: температура полного растворения γ' -фазы, объемная доля и средний размер частиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД после закалки с различных температур. Установлена объемная доля первичной (крупной) γ' -фазы для различных температур закалки. Для получения однородной мелкозернистой структуры закалка сплава ВЖ175-ИД проводится в двухфазной области, поэтому максимальная температура деформации не должна превышать температуру закалки и температуру полного растворения γ' -фазы.

Для изучения процессов рекристаллизации на сканирующем электронном микроскопе методом дифракции обратноотраженных электронов (EBSD-анализа) исследована микроструктура образцов, продеформированных по различным режимам с применением автоматизированного комплекса MTS 810-500, который предназначен для испытаний материалов и моделирования процессов деформации при различных температурах и режимах нагружения. Проведены дифрактометрические исследования рекристаллизации методом ω -сканирования с применением дифрактометра D/MAX-2500. На основании этих данных и результатов исследований структуры образцов после испытаний на сжатие определены оптимальные параметры деформации для формирования рекристаллизованной однородной ультрамелкозернистой микроструктуры в штамповках сплава ВЖ175-ИД.

Формирование в процессе деформации однородного рекристаллизованного ультрамелкого зерна позволяет получать при последующей термической обработке регламентированную структуру во всем сечении штамповки диска из сплава ВЖ175-ИД, тем самым обеспечивается стабильность (повторяемость) свойств в серийном производстве.

По результатам исследования процесса рекристаллизации построены диаграммы изменения структурно-фазового состояния сплава ВЖ175-ИД в зависимости от температуры и скорости деформации (рис. 5 и 6).

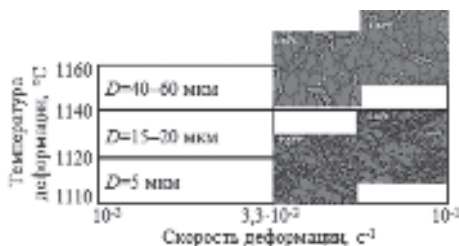


Рис. 5. Диаграмма структурного состояния сплава ВЖ175-ИД, построенная на основании результатов исследований методом дифракции обратноотраженных электронов (D – размер рекристаллизованного зерна)



Рис. 6. Диаграмма структурного состояния сплава ВЖ175-ИД, построенная на основании результатов рентгеноструктурных исследований:

I – область нерекристаллизованной структуры; II , III – области частичной и полной рекристаллизации соответственно; $C-C$, $C'-C'$ – граница области частичной и полной рекристаллизации соответственно

Диаграммы отражают переход от нерекристаллизованной структуры к рекристаллизованной в определенном температурном интервале в широком диапазоне скоростей деформации, при условии охлаждения образцов с температуры деформации до комнатной температуры вместе с печью.

На диаграмме (см. рис. 5) показаны значения размеров рекристаллизованных зерен (D). В области полностью рекристаллизованной структуры размер зерен равен 40–60 мкм и 15–20 мкм. В области частично рекристаллизованной структуры размер рекристаллизованных зерен составляет ~5 мкм. Изменение скорости деформации при постоянной температуре оказывает меньшее влияние на размер зерен, чем изменение температуры деформации, и при медленном охлаждении после осадки размер зерен практически одинаков.

На диаграмме (см. рис. 6) показаны области нерекристаллизованной структуры (I), частичной (II) и полной (III) рекристаллизации. Линии $C-C$ и $C'-C'$ представляют собой границы областей частичной и полной рекристаллизации.

Результаты проведенных исследований показывают, что, используя диаграммы структурного состояния, можно прогнозировать температурно-скоростные условия горячей деформации, определяющие для сплава получение заданной структуры – однородного рекристаллизованного ультрамелкого зерна (УМЗ) во всем сечении штамповки диска, и тем самым обеспечить стабильность (повторяемость) свойств при их серийном производстве.

Результаты исследований в сочетании с экспериментальными данными позволили разработать концепцию управления микроструктурой для достижения нужного комплекса свойств новых материалов.

Особое значение в этом случае приобретают следующие факторы:

- выбор температуры штамповки и последующей термообработки с учетом температуры полного растворения γ' -фазы и реакций образования карбидов;
- выбор степени деформации – чем сложнее форма полуфабриката, тем более жесткие требования к технологии;
- скорость деформации, предусматривающая правильный выбор размеров заготовки;
- термическая обработка после штамповки.

В связи с большими трудностями проведения исходной обработки дисковых материалов давлением в промышленных условиях в однофазном состоянии были разработаны технологические процессы деформации сплавов в двухфазном состоянии, обеспечившие повышение технологической пластичности и снижение их сопротивления деформации путем формирования оптимальной структуры [5]. Этот процесс включает получение заготовок с контролируемыми размерами зерен твердого раствора и определенным характером распределения частиц упрочняющей γ' -фазы, карбидов, боридов и т.п. Формирование такой структуры достигается предварительной гомогенизацией литого материала, последующей деформацией и промежуточными отжигами в процессе деформации.

Для выравнивания химической и дендритной неоднородности, растворения избыточных фаз гомогенизация слитков проводится при температурах, превышающих $T_{п.р}$ γ' -фазы, далее материал охлаждается до температур, при которых происходит максимальная коагуляция частиц γ' -фазы. Теоретически гомогенизация должна устранить дендритную ликвацию, но обычно требуемое для этого время неприемлемо для про-

мысленных условий. Сокращение трудоемкости процесса гомогенизации достигается при его проведении после предварительной осадки или подпрессовки литой заготовки.

В качестве методов первичной горячей деформации слитков дисковых жаропрочных сплавов были использованы ковка и горячее прессование (экструзия) на гидравлических прессах усилием до 6000 тс.

Для повышения технологической пластичности полученных заготовок перед объемной штамповкой требуется гомогенизирующий отжиг, обеспечивающий снятие остаточных напряжений от предыдущей деформации, необходимую коагуляцию частиц γ' -фазы, а также оптимальное расстояние между ними. В этом случае усилия деформации в основном определяются меньшими напряжениями, необходимыми для изгиба дислокаций между частицами, а не перерезанием их. Исследование характеристик пластичности поковок сплава ЭП742-ИД после специально разработанного отжига показало более высокие значения допустимой степени деформации при осадке, ударной вязкости, относительного удлинения и сужения у материала в широком температурном интервале (1000–1150°C). Расширение температурного интервала повышения пластичности в области высоких температур очень важно для промышленного производства.

Повышение однородности структуры и пластичности заготовок перед штамповкой вследствие улучшения условий деформации положительно сказывается на стабильности механических свойств поковок дисков после окончательной термической обработки.

Проведенные исследования показали, что для производства штамповок дисков из сложнолегированных сплавов, содержащих более 40% упрочняющей γ' -фазы, необходим перевод материала заготовок для штамповки в сверхпластичное состояние.

Горячее прессование или прокатка с большими обжатиями слитков из этих сплавов, прошедших предварительную гомогенизацию, при температурах двухфазной области позволяют получить мелкозернистую структуру (≤ 10 мкм), стабильность которой обеспечивается наличием большого количества γ' -фазы. При исследовании прессованного материала сплавов типа ЭК151 и ЭП975 установлено наличие эффекта сверхпластичности и микродуплексной структуры. При оптимальных условиях деформации максимально достигнутые значения относительного удлинения при испытаниях на разрыв составили 700–800%.

Сплавы после прессования имеют мелкозернистую двухфазную структуру матричного типа. Морфология и размер γ' -фазы оказывают большое влияние на характеристики сверхпластичности. Например, при температуре 1080°C и скорости деформирования 100 мм/мин напряжения течения сплава ЭП975 с кубическими и округлыми выделениями γ' -фазы составили соответственно 600 и 400 МПа.

Реализация эффекта сверхпластичности при формообразовании заготовок диска осуществляется в процессе изотермической штамповки. Заготовки в состоянии сверхпластичности выдерживают однократную осадку на гидравлических прессах со степенью деформации до 80% без образования трещин.

Важным звеном реализации идеи управления микроструктурой и получения оптимальных свойств сплавов явилось изучение процессов структурообразования после окончательной штамповки и упрочняющей термической обработки. Исследованы структура, фазовый состав и меха-

нические свойства заготовок дисков сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД и ЭК151-ИД после окончательной штамповки в двухфазной ($T_d < T_{п.р\gamma'}$) области и последующей упрочняющей термической обработки с закалкой из однофазной и двухфазной областей. Следует отметить, что после деформации в двухфазной области материал находится в частично рекристаллизованном состоянии, структура чрезвычайно мелкозернистая (12–14 балла), с ликвацией γ' -фазы. Причем для всех сплавов характер микроструктуры идентичен и зависит от температуры окончательной штамповки (T_d).

Нагрев материала, продеформированного в однофазной области, под закалку почти не изменяет его структуру, а при нагревах материала, продеформированного в двухфазной области, происходит завершение рекристаллизации при обработке. При температурах нагрева, близких к $T_{п.р\gamma'}$, в обоих случаях начинается собирательная рекристаллизация.

Анализ фазового состава в зависимости от температуры деформации и закалки, а также старения свидетельствует о заметном влиянии деформационной термической обработки на количество γ' -фазы и карбоборидной фазы. Следует также отметить, что как при закалке, так и при старении наблюдаются температурные области, в которых количество боридных выделений имеет максимальное значение.

Процессы структурообразования и изменения фазового состава, происходящие в зависимости от параметров деформации и последующей упрочняющей термической обработки, оказывают существенное влияние на комплекс механических свойств жаропрочных дисковых сплавов.

Из полученных данных следует, что оптимальный комплекс свойств достигается независимо от температуры последней деформации, после закалки при температурах, близких к $T_{п.р\gamma'}$. Стабильность структуры, полученной при деформации в однофазной области, позволяет использовать закалку в двухфазной области и обеспечить при этом за счет сохранения мелкозернистой структуры повышение прочности и жаропрочности до температур порядка 750°C.

В результате проведенных исследований были обоснованы, разработаны и реализованы принципы получения регламентированной микроструктуры в штамповках сложнoleгированных жаропрочных дисковых сплавов, обеспечившие необходимый комплекс эксплуатационных свойств для созданных материалов (ЭК79, ЭК151, ЭП975) и существенное повышение свойств разработанных ранее серийных сплавов (ЭИ698, ЭП742).

Принципиальная схема термомеханической обработки (ТМО) включает подготовку структуры исходной заготовки, разовую или дробную изотермическую деформацию в режиме сверхпластичности с промежуточными отжигами и окончательную термическую обработку. В зависимости от используемых исходных полуфабрикатов (деформированные прутки серийного производства или слитки ВГНК производства ВИАМ) ТМО имеет свои особенности.

Для разработки оптимальных режимов ТМО и широкого внедрения разработанного процесса изготовления дисковых заготовок был решен комплекс задач:

- установлены оптимальные температурно-скоростные параметры деформации отжига сплавов;
- разработаны и созданы конструкции экономичных установок открытого (для работы в воздушной среде) типа для изотермической дефор-

мации при температурах до 1200°C;

- разработаны материалы и технологии изготовления штамповой оснастки с рабочей температурой до 1200°C на воздухе;

- разработаны смазочные технологические покрытия, обеспечивающие защиту заготовок от окисления и газонасыщения при нагреве и снижение усилий штамповки при деформации.

При использовании в качестве исходной заготовки прессованных прутков из высоколегированных никелевых сплавов ЭП975, ЭК151, ЭП742 и других была разработана термомеханическая обработка (ТМО), включающая гомогенизирующий отжиг и дробную изотермическую деформацию в режиме сверхпластичности с промежуточными отжигами.

Проведение отжигов по разработанным режимам обеспечивает коагуляцию (укрупнение) частиц γ' -фазы, что обеспечивает снижение удельных усилий штамповки, увеличение допустимой степени деформации до 70–80% и формирование ультрамелкого зерна при последующей деформации.

Для получения штамповок дисков с регламентированной мелкозернистой структурой были разработаны температурно-скоростные параметры изотермической деформации, обеспечивающие получение точных штамповок с регламентированной структурой.

Использование высоких скоростей деформирования на начальных этапах штамповки позволило обеспечить стабильную температуру деформации, а снижение скорости деформирования на заключительном этапе – реализовать эффект сверхпластичности и снизить удельные усилия штамповки. Использование промежуточного отжига и дробной деформации позволило обеспечить равномерную деформацию и, следовательно, структуру по всему объему штамповки (рис. 7 и 8). По разработанным режимам изотермической деформации и промежуточного

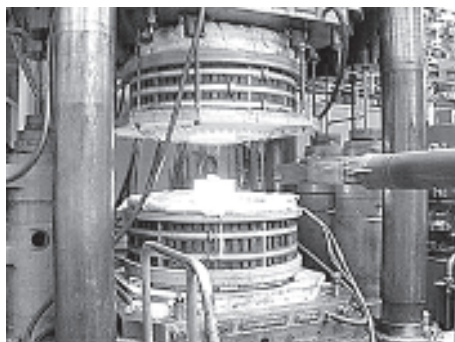


Рис. 7. Внешний вид штамповки из пресс-прутка сплава ЭП975 на заключительной операции деформации после подъема выталкивателем из штампа пресса усилием 1600 тс

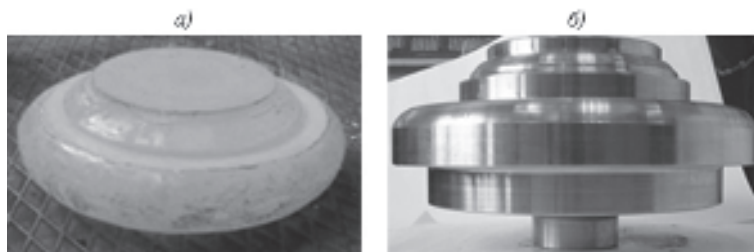


Рис. 8. Штампованная заготовка диска из прессованного прутка сплава ЭП975: а – после штамповки (масса 50 кг); б – в обточенном состоянии (внешний диаметр 294 мм)

отжига изготовлены заготовки с регламентированной мелкозернистой структурой диаметром до 210 мм на прессе усилием 630 тс и диаметром до 380 мм на прессе усилием 1600 тс (см. рис. 7).

После деформации штамповки имеют однородную микроструктуру по всему объему со средним размером зерна 8–10 мкм (рис. 9).

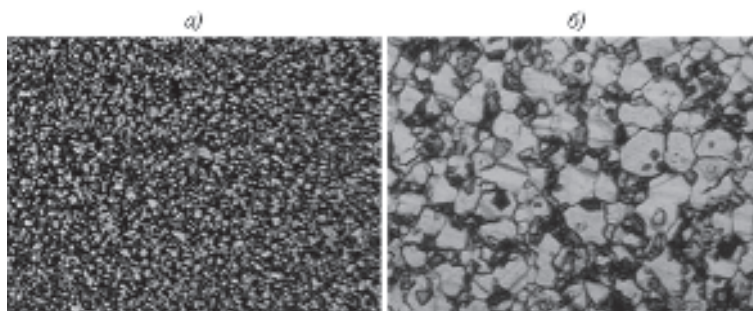


Рис. 9. Микроструктура (а – $\times 100$; б – $\times 500$) штамповки диска из сплава ЭП975

В случае изготовления малых партий дисков максимально эффективным оказывается применение в качестве исходной заготовки мерных литых заготовок, получаемых методом ВГНК. Такая технология является альтернативой технологии изготовления штамповок дисков из пресспрутка промышленного производства. При необходимости изготовления дисков из сплавов, производство прутковых заготовок которых не освоено промышленностью (сплавы ЭП975А и ВЖ175), такая технология является безальтернативной.

Процесс производства точных деформированных заготовок малоразмерных дисков из литых заготовок ВГНК включает три основные стадии:

- получение цилиндрической литой заготовки ВГНК;
- изготовление из литой заготовки посредством ТМО предварительной исходной заготовки с подготовленной структурой;
- окончательная изотермическая штамповка в режиме сверхпластичности.

Основной задачей является получение предварительной исходной заготовки с подготовленной структурой из литой заготовки, полученной методом ВГНК. Для решения этой задачи была разработана технологическая схема и режимы ТМО.

Разработанная технология включает гомогенизирующий отжиг слитка, деформационный передел слитка с промежуточными отжигами и изотермическую деформацию по режимам, разработанным для деформации прутковых заготовок.

Для получения однородного химического состава и повышения технологической пластичности слитка разработан режим предварительного гомогенизирующего отжига. Проведение отжигов по разработанным режимам обеспечивает также коагуляцию частиц γ' -фазы, что позволяет снизить удельные усилия штамповки, увеличить допустимую степень деформации до 30–40% и формирование ультрамелкого зерна при последующей деформации.

Применительно к слиткам ВГНК диаметром 100–105 мм и высотой 250–300 мм из сплавов ЭП975, ЭК151, ЭК79 и других в ВИАМ разрабо-

таны режимы ТМО для изготовления штамповок дисков, включающие подпрессовку с промежуточными отжигами в двух комплектах переходных контейнеров, изотермическую деформацию полученных заготовок в конической матрице по схеме осадки – вытяжки с целью интенсивной проработки структуры во всем объеме заготовки и окончательную штамповку.

В результате достигнут эффект формирования однородной мелкозернистой структуры (размер микрозерна ≤ 10 мкм) в предварительных заготовках, сопоставимый с эффектом процесса прессования крупных слитков на мощных прессах. При этом достигнуто значительное повышение КИМ на этой стадии передела за счет отсутствия пресс-остатка и исключения операции механической обработки заготовок. На рис. 10 показаны заготовки на промежуточной стадии ковочного передела литых заготовок ВГНК из сплава ЭК151 после вытяжки в конической матрице и осадки.



Рис. 10. Внешний вид заготовок на разных стадиях ковочного передела: а – после вытяжки; б – после осадки

В штамповках из слитка ВГНК сплавов ЭП975А и ВЖ175 после окончательной изотермической деформации получено однородное регламентированное микрозерно со средним свободным расстоянием между крупными (величиной 1,5–2,5 мкм) частицами γ' -фазы (зерно величиной ≤ 10 мкм) (рис. 11).

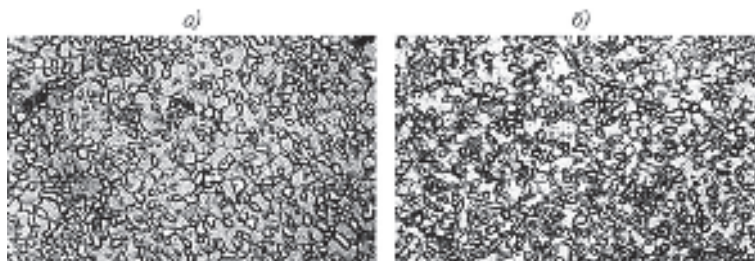


Рис. 11. Микроструктура ($\times 500$) в состоянии после деформации штамповок из сплавов ЭП975 (а) и ЭК151 (б)

Для практической реализации разработанных технологий в ВИАМ создано опытно-промышленное производство штамповок дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок производительностью до 1500 заготовок в год. По техническому заданию, разработанному в ВИАМ, на базе проведенных исследований проведена комплексная мо-

дернизация технологического оборудования, что позволило проводить в автоматическом режиме процессы нагрева и формоизменения заготовок, снизить энергоемкость производства и повысить производительность.

На участке изотермической штамповки были установлены нагревательные печи с программным управлением, позволяющие проводить нагрев, предварительную и промежуточную термическую обработку заготовок в узком температурном диапазоне с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Использование программного управления позволило проводить нагрев и охлаждение с заданной скоростью по программе, совместить промежуточные отжиги и нагрев под деформацию, что снижает энергопотребление на 20–30%. Модифицированы электрические схемы установок УИДИН 250 и УИДИН 500, что позволило повысить КПД индуктора в 2 раза и уменьшить продолжительность нагрева штампов до заданной температуры и время подогрева штампов.

Комплексная модернизация оборудования, в первую очередь, позволила обеспечить воспроизводимость технологических параметров процесса изготовления заготовок дисков, высокую стабильность структуры и механических свойств штамповок и организовать серийное производство высококачественной наукоемкой продукции (дисков из суперсплавов), отвечающей международным требованиям. При этом достигнуто увеличение КИМ в 2–3 раза, снижение трудоемкости и энергоемкости производства в 3–5 раз и повышение производительности процесса (по сравнению с изотермической штамповкой в вакууме) в 4–5 раз.

В настоящее время на созданном производстве осуществляется серийная поставка экономичных высококачественных штамповок из высокожаропрочных никелевых и высокопрочных титановых сплавов по заказам предприятий ОАО «Мотор Сич», ОАО «Кадви», ОАО «ОМЖБ» для изделий АИ450, МС500, «СЭС-75», «37» и др.

В течение 2009–2011 гг. в рамках серийных заказов поставлено 1060 штамповок дисков. Экономический эффект только за счет экономии металла при изготовлении одной штамповки составил ~136 тыс. рублей. Годовой экономический эффект, документально подтвержденный заказчиками за 2010 год, составил 38,5 тыс. рублей.

В 2010 году работа коллектива авторов под руководством Генерального директора ФГУП «ВИАМ», академика РАН, профессора Е.Н. Каблова «Создание и широкое внедрение инновационной технологии изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов для перспективных газотурбинных двигателей и энергетических установок, обеспечивающей повышение производительности, энергоэффективности и снижение материалоемкости производства» была удостоена Государственной премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / В сб. трудов науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (г. Екатеринбург). УроРАН. 2011. Т. 1. С. 31–38.

2. *Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М.* Технология крупногабаритного литья деталей ГТД и ГТУ с направленной и монокристаллической структурой и оборудование для их получения / В сб. трудов Международной науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. М.: ВИАМ. 2006. С. 263–269.

3. *Солнцев С.С., Розененкова В.А.* Защитные технологические покрытия на основе стекла для термической обработки сталей и сплавов // Стекло и керамика. 2006. № 11. С. 29–33.

4. *Некрасов Б.Р., Бубнов М.В., Склярченко В.Г., Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Арбина В.П.* Разработка и оптимизация технологии изготовления штамповки диска из сплава ЭП975-ИД с применением компьютерного моделирования / В сб. тезисов докл. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь в авиационном материаловедении». М.: ВИАМ. 2008. С. 25.

5. Способ получения изделий из жаропрочного никелевого сплава: пат. 230181 Рос. Федерации; опублик. 2007.

О.Г. ОСПЕННИКОВА, М.В. БУБНОВ, Д.В. КАПИТАНЕНКО

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Моделированием, как правило, называется представление объекта в некоторой форме, отличной от его реальных параметров. Применение моделирования позволяет понять, как устроен реальный объект, какова его структура, основные свойства, законы развития и взаимодействия с окружающим миром, научиться управлять объектом (или процессом), определять оптимальные способы управления им при заданных целях и критериях, а также прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на объект.

В процессе моделирования модель может быть представлена как копия объекта, выполненная из другого материала, в другом масштабе или с отсутствием некоторых деталей, а также выражена в абстрактной форме (математическая модель). Математическая модель выражает существенные черты объекта или процесса языком уравнений и других математических средств.

Для математического моделирования процесса штамповки изделий сложной формы необходимо учитывать его основные особенности:

- нестационарность поля скоростей течения металла на протяжении всего процесса (от начала деформирования исходной заготовки до получения готового изделия);
- нестационарность температурного поля;
- переменный характер кинематических, силовых и температурных граничных условий для краевых задач определения соответствующих величин.

Необходимо также учитывать максимально полный перечень факторов, определяющих получение регламентированной структуры и точность прогнозирования неразрушаемости заготовки в заданных деформационных условиях.

Успехи в развитии численных методов и наличие современной вычислительной техники дают возможность строить математические модели,