

УДК 669.01.(07)

## ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

© Радик Рафикович Мулюков<sup>1</sup>, Айрат Ахметович Назаров<sup>1</sup>,  
Фарид Зайнуллаевич Утяшев<sup>1</sup>, Рафаэль Юрьевич Сухоруков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, г. Уфа

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

[www.imsp.ru](http://www.imsp.ru); [www.imash.ru](http://www.imash.ru)

***Аннотация.** В статье представлено современное состояние и развитие научных основ сверхпластической деформации применительно к методу раскатки для изготовления деталей и конструкций ответственного назначения из жаропрочных сплавов.*

*Показано, что формирование в жаропрочных сплавах микрокристаллической структуры позволяет осуществлять их деформирование в условиях сверхпластичности и тем самым изменять их физико-механические и технологические свойства. Изделия, полученные по этой технологии, имеют однородную структуру и изотропные свойства или регламентированную градиентную структуру, соответствующую реальным условиям эксплуатации. Описаны принципы работы оборудования для сверхпластической раскатки дисков ГТД.*

**Ключевые слова:** сверхпластическая деформация (СПД), микрокристаллические (МК) материалы, жаропрочные сплавы, раскатка, диски ГТД.

### Введение

Диски роторов газотурбинных двигателей (ГТД) при эксплуатации подвергаются воздействию высокого давления сильно разогретого газа и значительных центробежных сил.

По этой причине их изготавливают из сложнолегированных жаропрочных сплавов на основе никеля, титана и железа. Наиболее дорогостоящими из указанных сплавов являются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС). В сущности, современные гетерофазные ЖНС при температуре эксплуатации представляют собой наноструктурированные материалы. Свыше 50 % объема в них занимают наноразмерные частицы интерметаллидной  $\gamma'$ - фазы. Эти частицы, образуя с сильнолегированной матрицей стабильные когерентные границы и являясь стопорами для дислокаций, обеспечивают сплавам высокую жаропрочность при эксплуатации. Вместе с тем, дисперсная  $\gamma'$ - фаза, оказывая большое сопротивление сдвигу и резко снижая пластические свойства матрицы, представляющей собой сложнолегированный твердый раствор, существенно затрудняет процесс обработки таких сплавов давлением.

По этой причине процессы горячейковки и штамповки дисков отличаются чрезвычайной трудоемкостью и обеспечивают низкий, не превышающий 10-15 %, коэффициент использования металла. При этом из-за неравномерного распределения деформации в дисках формируется неоднородная структура, вследствие которой конструкционная прочность деталей оказывается ниже потенциально возможной.

В отличие от российских предприятий, технологии изготовления дисков, применяемые ведущими мировыми производителями авиадвигателей, основаны на использовании сверхпластической штамповки. Однако для этого процесса требуются дорогостоящие вакуумно-штамповочные комплексы, включающие вертикальные прессы с усилием около 20000 т и большую номенклатуру массивных штампов, выполняемых из дефицитных молибденовых сплавов. В качестве исходных заготовок западные компании используют

порошковые сплавы, деформированные с большими степенями на мощных горизонтальных прессах. После такой деформационной и последующей термической обработки дисковые сплавы приобретают необходимую однородную структуру с оптимальным размером зерен, обеспечивающим им высокие эксплуатационные свойства.

В России порошковые диски получают спеканием порошка в газостатах, т.е. без существенной деформационной проработки, что не позволяет достичь максимального уровня механических свойств, характерных для деформированных ЖСН. Следует отметить, что оснащение российских предприятий оборудованием и технологиями, используемыми за рубежом, требует громадных инвестиций, что вряд ли оправдано. Накопленные западными компаниями в течение 50-летнего использования сверхпластичной штамповки опыт и «ноу-хау» обеспечивают им лидирующие позиции в производстве и на рынке ГТД. Кроме того, для всех отмеченных процессов характерен низкий коэффициент использования металла, особенно на стадии получения порошков и при обычной горячей деформации. В последнем случае нередко возникает неисправимый брак из-за огрубления структуры вследствие неоднородной деформации.

Для отечественных предприятий важно использовать свои национальные достижения. К таковым еще в период существования Минавиапрома СССР была отнесена технология раскатки дисков и других осесимметричных деталей ГТД в условиях сверхпластичности. Наряду с существенной экономией материала, энергии и трудозатрат, эта технология позволяет получать изделия, отличающиеся высокими свойствами, надежностью и повышенным ресурсом эксплуатации.

В данной статье рассмотрены основные научные положения, используемые в технологии раскатки дисков ГТД в условиях сверхпластичности [1,2], обеспечивающие более высокую эффективность процесса их изготовления и качество по сравнению с традиционными процессами.

### **Раскатка дисков из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности как деформационная нанотехнология**

К нанотехнологиям относят процессы обработки материалов, в которых вследствие воздействия на наноразмерные элементы<sup>1</sup> структуры или их синтеза полуфабрикаты и изделия приобретают высокие технологические и эксплуатационные свойства. По сути, технология раскатки дисков из жаропрочных никелевых сплавов является нанотехнологией. Сначала, на первом этапе, посредством деформационно-термической обработки в ЖНС изменяют состояние наноразмерных интерметаллидных частиц. Их укрупняют до размеров 300-1000 нм, меняют место их расположения от внутризеренного к межзеренному. При этом изменяют также тип межфазных границ, которые преобразуются от когерентных к некогерентным, так что углы разориентировки между сходственными кристаллографическими осями и плоскостями фаз становятся большеугловыми. Одновременно до размеров от одного до нескольких микрометров измельчают зерна матрицы, границы которых вследствие адсорбции решеточных дислокаций приобретают неравновесное состояние. В результате такого преобразования структуры ЖНС приобретают противоположные свойства - при температурах, близких к температуре эксплуатации, они теряют жаропрочность и приобретают сверхпластичность. Причиной такого кардинального изменения свойств является существенное увеличение расстояния между частицами  $\gamma'$ - фазы и рост протяженности границ зерен и фаз, что облегчает как внутризеренную деформацию матрицы, так и проскальзывание по границам зерен и фаз. Благодаря такому преобразованию структуры ЖНС приобретают не только высокую пластичность, но и низкое напряжение

<sup>1</sup> К наноразмерным элементам относят элементы структуры, имеющие хотя бы в одном направлении размер менее 100 нм, например, границы зерен и фаз, т.к. их толщина не превышает 0,2-0,3 нм.

течения, что важно для снижения нагрузки на инструмент и мощности деформирующего оборудования.

Вторым этапом осуществляют формообразование дисков методом раскатки в условиях сверхпластичности, а в завершение производят термообработку дисков с целью наделения их высокой прочностью и жаропрочностью. Иными словами, зерна матрицы обратно укрупняют, частицы  $\gamma'$ - фазы уменьшают до нанометрических размеров, а межфазные границы преобразуют в когерентные. Таким образом, путем деформационно-термического воздействия достигается управление размерами и характером расположения наноразмерных элементов структуры ЖНС - переход от нанометрических размеров до микрометрических, от строго совпадающей направленности кристаллографических осей на межфазных  $\gamma/\gamma'$  границах до большеугловых разориентировок и обратно, благодаря чему сначала осуществляется переход от нетехнологичных жаропрочных свойств до технологичных сверхпластичных свойств, а затем в готовом изделии восстанавливаются свойства жаропрочности.

Что касается дисковых сплавов на основе титана, для них варьирование микроструктуры от состояния с наноразмерными выделениями  $\alpha$ - фазы к состоянию с коагулированными частицами этой фазы с точки зрения возможности обработки давлением не столь важно. Из-за гексагональной кристаллической структуры этой фазы, ограничивающей число систем скольжения дислокаций, деформация этих сплавов сопровождается активным двойникованием. В результате такой «внутренней немонокотности» деформирования пластинчатая структура сплавов преобразуется в глобулярную, что обеспечивает сплавам развитие сверхпластической деформации. Поэтому пластические свойства этих сплавов даже при наличии исходной наноразмерной пластинчатой структуры остаются высокими. Однако, как будет показано ниже, с точки зрения технологичности деформации, для этих сплавов так же, как и для ЖНС, важно применять заготовки с микрокристаллической (МК) структурой, получаемой в результате предварительной деформации, в ходе которой происходит преобразование пластинчатой нанофазы в скоагулированную фазу.

### **Технологичность микрокристаллических материалов и обработка в условиях сверхпластичности**

Рассмотрим теперь чрезвычайно важные для таких деталей ответственного назначения, как диски ГТД, технологические особенности использования для их формообразования условий сверхпластической деформации.

Технологичность материала - это совокупность свойств, обеспечивающих возможность изготовления из него изделий с заданным качеством при минимальных затратах. В процессах обработки металлов давлением (ОМД) технологичность материала, которая может быть высокой или низкой, определяется не только характеристиками пластичности и деформируемости материала, но и рядом других, не менее важных параметров. В их числе - допустимые рамки изменений режимов обработки и их контролируемость. Особенно важной при изготовлении изделий ответственного назначения является гарантированность и надежная контролируемость структуры и физико-механических свойств, приобретенных материалом в результате деформации. В этом отношении несомненным преимуществом обладают материалы с микрокристаллической структурой, хотя получение таких материалов требует дополнительных трудозатрат. Выделим технологические аспекты преимуществ, которые предоставляет применение микрокристаллических материалов в ОМД.

*Деформируемость.* Обычно конструкционные многофазные сплавы в зависимости от метода изготовления из них деталей разделяют на литейные и деформируемые. Литейные сплавы должны иметь повышенную жидкотекучесть, малую усадку, минимальное газопоглощение и ряд других характеристик, необходимых для получения из них качественных изделий литьем [3]. Вместе с тем, для придания изделиям из литейных

сплавов их сильно легируют множеством элементов, поэтому эти сплавы обладают низкой для обработки давлением технологичностью.

Методами ОМД детали изготавливают из деформируемых сплавов. Эти сплавы должны обладать достаточной в исходном литом состоянии пластичностью для обработки давлением, и поэтому они легируются в меньшей степени, чем литейные сплавы того же класса. Потенциал механических свойств сложнолегированных литейных сплавов можно было бы использовать для повышения конструкционной прочности деталей, если бы последние получали не литьем, а методами ОМД, однако этому препятствует отмеченная выше низкая технологичность этих сплавов.

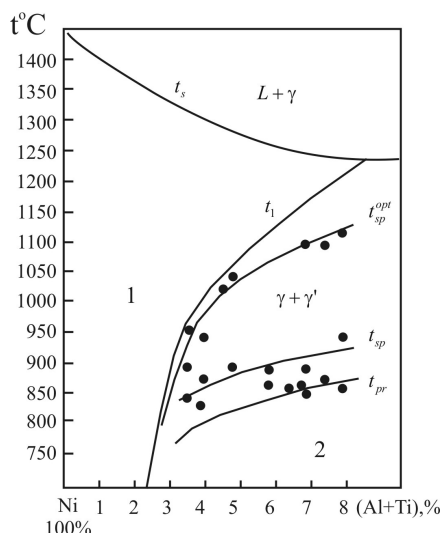
С открытием и систематическим изучением явления сверхпластичности металлов и сплавов выяснилось, что высокопластичными могут быть практически все кристаллические материалы. В классе металлов таковыми становятся даже, например, хрупкие литейные чугуны [4], сложнолегированные жаропрочные сплавы. Более того, на примере тех же жаропрочных материалов показано [1], что, чем сложнее химический состав сплава, тем более высокие сверхпластические свойства он проявляет. Поэтому разделение сплавов по химическому составу на литейные (недеформируемые) и деформируемые становится условным. Эта условная технологическая классификация материалов «размывается» двойственностью природы сверхпластической деформации (СПД). С одной стороны, СПД – это пластическая деформация твердого материала, с другой стороны, она обладает явно выраженными свойствами вязкого течения материала и аналогична литью, поэтому нередко в технологическом понимании СПД характеризуют как некий процесс твердофазного литья.

Сверхпластичность изменяет также представления о понятии труднодеформируемости. Последнее означает большое сопротивление, оказываемое материалом процессу его деформирования. При этом сопротивление деформации  $\sigma_s$ , так же, как и пластичность, рассматривалось как свойство, проявляемое сплавом в определенных термомеханических условиях деформации, включая схему деформирования, зависящее, прежде всего, от его химического состава. При обычной горячей деформации повышенное значение  $\sigma_s$  присуще крупнозернистым сплавам, выплавленным из более сложной композиции элементов, особенно, если их основу составляют более тугоплавкие элементы, а также элементы, образующие упрочняющие частицы. При СПД эта закономерность также нарушается. Многие сложнолегированные сплавы в сходных условиях обработки оказывают меньшее сопротивление деформации, чем малолегированные. К их числу принадлежат жаропрочные сплавы с мелкозернистой структурой. Более того, нередко имеет место ситуация, когда при СПД сплав на основе относительно тугоплавкого металла деформируется при равных и даже меньших напряжениях течения, чем крупнозернистый сплав на основе элемента с меньшей температурой плавления. Причем это наблюдается не только в сходных по гомологическим температурам условиях деформации, но и при равных по абсолютной величине температурах. В частности, титановые сплавы с нанокристаллической (НК) и субмикрокристаллической (СМК) структурой можно деформировать при температурах 400-500°C так же, как обычные крупнозернистые алюминиевые сплавы, и при этом требуется меньшее напряжение течения, чем, например, для крупнозернистой латуни.

В этой связи, более общим представляется разделение промышленных сплавов не по уровню деформационных свойств, проявляемых ими в традиционных технологиях, а по состоянию структуры - на микрокристаллические и обычные грубозернистые. В микрокристаллическом состоянии все сплавы в определенных температурно-скоростных условиях деформации обладают высоким уровнем запаса пластичности и небольшим сопротивлением деформации, а грубозернистые сплавы с тем же химическим составом являются труднодеформируемыми. С позиций обрабатываемости такое разделение промышленных сплавов равносильно делению их на технологичные и нетехнологичные материалы.

Рассмотрим далее на примере жаропрочных сплавов обобщенную картину изменения технологических свойств, важных для режимов обработки, в зависимости от микроструктуры.

На рис. 1 с помощью псевдодиаграммы показаны области деформации крупнозернистых и мелкозернистых (микроструктурных) сплавов. Температурная область деформации крупнозернистых сплавов (область 1) ограничена линиями, близкими к линиям солидуса и сольвуса, т.е. преимущественно областью существования однофазного  $\gamma$ -раствора, при этом при пониженных температурах деформации (около 800°C и менее) деформируются только слабостареющие сплавы с малым содержанием  $\gamma'$ -образующих элементов.



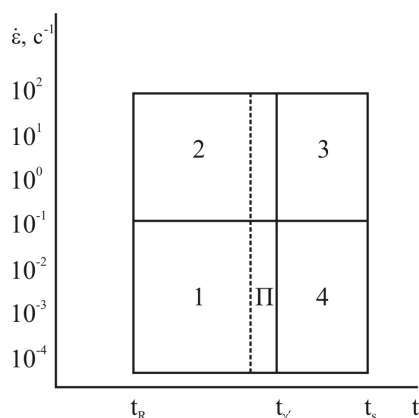
**Рис. 1.** Схема, демонстрирующая температурные области обычной (1) и сверхпластической (2) деформации ЖНС в зависимости от содержания в них  $\gamma'$ -образующих элементов;  $t_{sp}^{opt}$ ,  $t_{sp}$  — линии оптимальной и нижней температуры СПД для МК сплавов,  $t_{pr}$  — нижняя граница СПД СМК сплавов;  $t_s$  — линия солидуса,  $t_1$  — линия сольвуса

Для мелкозернистых сплавов деформационная область лежит ниже линии сольвуса и снизу ограничена, в зависимости от размера зерен, линиями, обозначенными  $t_{sp}$  и  $t_{pr}$ , соответственно, для материалов со средним размером зерен  $d_{cp} \in (1-10)$  мкм и  $d_{cp} \in (0.1-1)$  мкм. Кроме того, линия  $t_{sp}^{opt}$  показывает температуры оптимальной сверхпластичности для МК сплавов разного состава. Видно, что чем меньше размер зерен, тем сильнее расширяется температурная область деформирования. Для ЖНС с НК структурой нижняя граница СПД снижается вплоть до значений около 700°C [5].

Ранее было показано, что измельчение зерен дает различный эффект в улучшении деформируемости для мало-, средне- и сложнолегированных сплавов. Обычно крупнозернистые гетерофазные сплавы с более сложным химическим составом проявляют худшие технологические свойства, причем могут деформироваться в более узком температурном интервале, чем низколегированные сплавы. Для жаропрочных сплавов с микроструктурной и СМК структурами картина существенно меняется: с увеличением в них содержания  $\gamma'$ -образующих элементов температурный интервал для обработки давлением расширяется и, как уже отмечено, повышается их пластичность.

Значительно отличаются также возможности обработки крупнозернистых и мелкозернистых сплавов с точки зрения температурно-скоростных интервалов деформации. На рис. 2 представлен принципиальный вид карты температурно-скоростных условий деформации для жаропрочных сплавов с крупнозернистым и мелкозернистым строением, где цифрами и буквами обозначены возможные и предпочтительные области их деформирования.

По температурной оси эта условная  $T-\dot{\epsilon}$  диаграмма включает интервал горячей деформации между температурой нижнего порога рекристаллизации жаропрочных сплавов  $t_R$  и температурой, близкой к температуре солидуса  $t_s$ , поскольку нагрев выше последней опасен из-за перегрева и оплавления легкоплавких фаз («пережога» границ) вследствие теплового эффекта деформации. По оси скоростей диаграмма ограничена максимальным уровнем скорости деформации жаропрочных сплавов, характерным для обработки на молотах -  $10^2 \text{ с}^{-1}$  и минимальным уровнем, обеспечиваемым специальными гидравлическими прессами для изотермической деформации -  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Средняя линия, соответствующая скорости  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , взята как разделяющая температурно-скоростную область на деформацию посредством гидропрессов и молотов (ниже и выше этой линии, соответственно) и одновременно на области обычной и высокоскоростной СПД. Линия  $t=t_\gamma$  делит поле диаграммы на однофазную и двухфазную области.



**Рис. 2.** Схематическое изображение температурно-скоростных областей деформации для жаропрочных никелевых сплавов с мелкозернистой и крупнозернистой структурами;  $t_R$  – нижний порог рекристаллизации,  $t_\gamma$  – температура растворения  $\gamma'$  – фазы,  $t_s$  – температура, близкая к температуре солидуса

Сплавы с мелкозернистой структурой можно деформировать в областях 1, 2, 3 и П (переходная область). При этом область 1 соответствует обычной и низкотемпературной СПД, 2 – высокоскоростной СПД и высокой пластичности, П представляет собой область с пониженными сверхпластическими свойствами вследствие частичного растворения  $\gamma'$  – фазы, а 3 – это область, в которой вследствие полного растворения  $\gamma'$  – фазы и роста зерен деформация исходно мелкозернистого сплава переходит в обычную, характерную для крупнозернистого материала.

Для крупнозернистых сплавов деформационные области – это прямоугольники 3 и П. Область 3 используется для деформирования мало- и среднелегированных сплавов с помощью кривошипных прессов и молотов, а область П при температурах, близких к полному растворению  $\gamma'$  – фазы, используется для деформирования высоколегированных сплавов на гидропрессах. Область 4 обычно не используется для формообразующей деформации вследствие значительного огрубления структуры при деформации в однофазной области с небольшими скоростями. Для сложнолегированных сплавов, как отмечалось ранее, температурный интервал между температурой полного растворения  $\gamma'$  – фазы и температурой, близкой к температуре солидуса  $t_s$ , весьма мал, поэтому эти сплавы также практически не деформируют в однофазной области.

Таким образом, из представленных на рис. 1 и 2 схем видно, что сплавы в мелкозернистом состоянии предоставляют более широкие технологические возможности для их обработки, чем крупнозернистые. При этом наиболее предпочтительной областью для деформации является область 1, соответствующая классической или низкотемпературной СПД, что позволяет снизить температурно-силовую нагрузку на инструмент. В целом, расширенный температурно-скоростной интервал деформации мелкозернистых

жаропрочных сплавов предоставляет возможность оптимизировать выбор режимов их обработки по совокупности затрат, связанных с программой выпуска деталей, производительности процесса, энергопотреблению и стойкости инструмента. Кроме того, очевидно, что расширенные рамки температурно-скоростных режимов легче обеспечить, чем узкие.

Другой важный аспект повышения технологичности при использовании СПД связан с её влиянием на структуру и качество деталей.

*Однородность структуры.* Сопутствующим следствием значительного измельчения зерен в сплавах является повышение однородности их структуры.

Однородность - понятие идеализированное, означающее отсутствие какого-либо изменения любого параметра, характеризующего строение материала, следовательно, и его структурно-чувствительных свойств, в любом направлении. Для поликристаллических материалов однородность - это относительное, многоуровневое свойство, его можно определить с помощью некоего представительного объема материала, например, содержащего определенное число зерен, в котором изменение химического, фазового и зеренного строения, включая плотность и распределение дефектов кристаллической решетки, практически такое же, как и в любом другом таком же объеме. Чем меньше такой объем, тем однороднее структура. Очевидно, что если такой объем и существует в крупнозернистых материалах, например, с размером зерен в 1 мм, то он будет, по меньшей мере, в 1000 раз больше, чем в микрокристаллическом. Но чаще всего такого объема в крупнокристаллическом материале вообще нет, поскольку ему присуща ликвация, металлографическая и кристаллографическая текстуры.

На уровне фрагментов однородность структуры повышается с уменьшением размера ячеек и субзерен, поскольку усреднение по большому числу ячеек или субзерен «выравнивает» распределение напряжений внутри фрагмента. На мезо- и макроуровне однородность структуры повышается с уменьшением размеров фрагментов, поскольку на больших расстояниях сумма разориентаций ячеек нивелирует свойственную кристаллу анизотропию по направлениям. В этой связи, понятно, что микрокристаллические материалы зерна с большеугловыми границами обеспечат выравнивание свойств на более коротких расстояниях, чем субзерна, границы которых мало изменяют разориентировку материала на больших расстояниях.

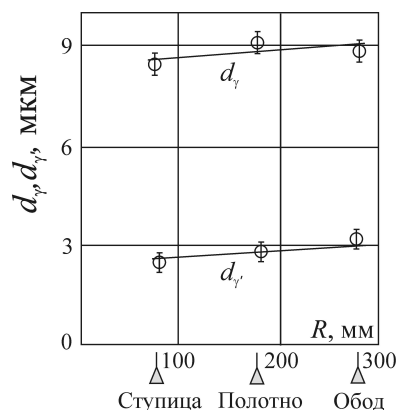
Для большинства процессов обработки давлением характерно неравномерное распределение деформации, что обусловлено как самой природой процесса деформации кристаллических материалов, так и особенностями операций формообразования, в которых обычно невозможно обеспечить равные величины и скорости деформации различным частям заготовки. В традиционных процессах также невозможно поддерживать постоянную и одинаковую температуру в разных частях деформируемой заготовки.

Неравномерность деформации заготовок из жаропрочных сплавов при формообразовании деталей часто становится причиной отбраковки последних из-за получаемой вследствие этого неоднородной структуры и свойств. Поэтому в традиционных процессах горячей деформации, включая изотермическую, количество операций формообразования регламентируется не только исходя из ресурса пластичности материала, но и с учетом необходимости более или менее однородного распределения деформации в различных участках заготовки. В результате увеличивается число операций, потери металла в отходы, повышаются трудоемкость и затраты кузнечного производства.

Особенность СПД, основным механизмом которой является зернограницное проскальзывание [1], заключается в том, что она не приводит к изменению мелкозернистой структуры деформированного материала. Иначе говоря, структура деформированных в условиях СПД материалов не зависит от степени деформации, а зависит только от скорости и температуры деформации. В том случае, если температура и скорость деформации соответствуют режиму СПД, структура остается стабильной и по размерам, и по форме зерен и характеризуется низкой, как в хорошо отожженном металле, плотностью

дислокаций. В качестве примера на рис. 3 приведены данные измерений среднего размера зерен матрицы и  $\gamma'$ - фазы в жаропрочном диске из сплава ЭП962, изготовленного раскаткой в условиях сверхпластичности.

Особенностью самого процесса раскатки является неравномерное деформирование заготовки по участкам. Так, в зоне ступицы материал диска практически не деформируется, в полотно и обод он подвергается деформациям, эквивалентным  $\delta=200-300\%$  и  $50-100\%$ , соответственно. Тем не менее, размеры зерен матрицы и интерметаллидной фазы во всем объеме раскатанного крупногабаритного диска диаметром около 600 мм практически одинаковы. Это свидетельствует о высокой степени однородности структуры материала, подвергнутого СПД.

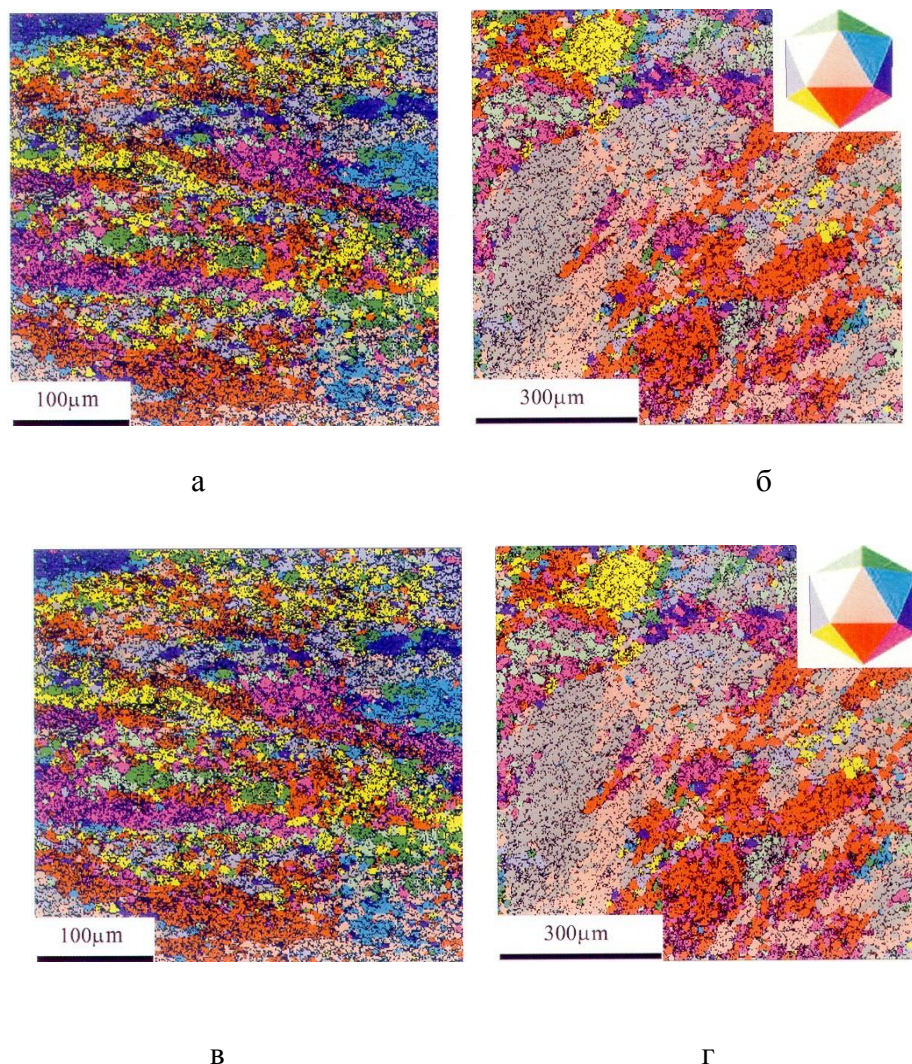


**Рис. 3.** Распределение среднего размера зерен матрицы  $d_\gamma$  и  $\gamma'$ - фазы  $d_{\gamma'}$  в поперечном сечении диска из сплава ЭП962, изготовленного раскаткой в условия сверхпластичности

Более того, СПД способствует выравниванию химического, фазового и зеренного строения материала, если даже в исходном состоянии соответствующие неоднородности присутствовали. Повышение однородности структуры при СПД обусловлено активизацией процессов дробления отдельных крупных зерен, фазовых превращений и диффузионного перераспределения элементов.

*Текстура.* Отсутствие текстуры является другим важнейшим условием, обеспечивающим однородность структуры и свойств поликристаллических материалов. В основе влияния текстуры на механические свойства металлов и сплавов лежит кристаллографическая анизотропия различных механических характеристик. Иногда наличие острой кристаллографической текстуры и обусловленной ею анизотропии механических свойств являются желательными и необходимыми характеристиками материала [6]. Однако для деталей машин, работающих в условиях сложного, меняющегося по величине и направлению нагружения, обычно выгодно бестекстурное состояние материала, которое обеспечивает изотропность механических свойств. Именно такое текстурное состояние материала формируется в результате использования СПД. Это происходит по двум причинам. Первая обусловлена мелкозернистостью сверхпластичных полуфабрикатов. Измельчение зерен в процессе подготовки микроструктурной структуры обычно в большей или меньшей мере приводит к относительно случайному распределению кристаллографических ориентировок в материале. Наглядно это демонстрирует сравнение картин распределения ориентировок зерен в крупнозернистом и мелкозернистом состояниях титанового сплава Ti 6242, полученных методом EBSD анализа [7] (рис. 4). В этой картине близость и сильное отличие оттенков цветов участков материала означает соответственно близость или сильное отличие их кристаллографических ориентировок. Видно, что в мелкозернистом состоянии сплава ориентировки весьма малых участков кристалла распределены однородно-случайно, тогда как в крупнозернистом сплаве имеются протяженные участки с близкими ориентировками.





**Рис. 4.** Распределения ориентировок зерен в крупнозернистом - а) и б) и микрокристаллическом - в) г) состояниях титанового сплава Ti 6242, полученные методом EBSD анализа [7] -а), в) до деформации; б), г) – после соответственно обычной и сверхпластической деформации

Вторая причина связана с действующим при СПД основным механизмом деформации – зернограничным проскальзыванием, которое приводит к размытию текстуры. Поэтому при СПД с увеличением степени деформации хаотичность распределения ориентировок зерен увеличивается.

В итоге, благодаря этим особенностям, изделия, полученные с применением СПД, отличаются повышенной изотропностью механических свойств.

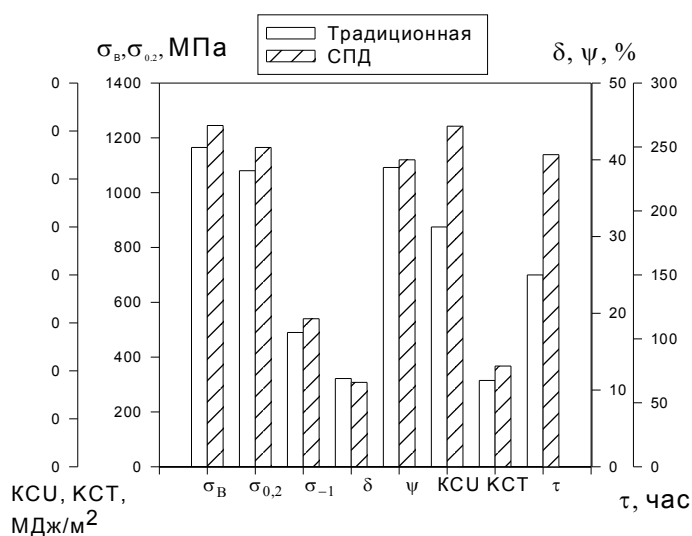
*Механические свойства.* Наличие однородной микрокристаллической структуры в деталях, изготовленных в условиях СПД, позволяет, в сочетании с термообработкой, расширить рамки варьирования механических свойств сплавов и получать таким образом изделия с регламентированными свойствами. В частности, как было отмечено выше, изменение свойств ЖНС от жаропрочных к сверхпластическим и наоборот связано с измельчением и укрупнением зерен матрицы, соответственно. Измельчение зерен достигается деформацией, а укрупнение - термообработкой. Поскольку изделия из ЖНС могут эксплуатироваться в достаточно широком интервале температуры и времени, то каждому характерному условию эксплуатации наилучший комплекс требуемых механических свойств может обеспечивать структура с определенным размером зерен.

Например, в короткоресурсных, форсированных ГТД большое значение имеет повышенный уровень кратковременной прочности, а такая характеристика жаропрочности, как ползучесть, становится не столь важной. Таким требованиям отвечают сплавы с относительно небольшими размерами зерен [8]. В случае длительной эксплуатации изделия при повышенных температурах необходимо высокое сопротивление ползучести и длительная прочность, которые свойственны сплавам с крупнозернистой структурой [9]. Термообработка жаропрочных сплавов, как известно, способна увеличить размер зерен, но не позволяет его уменьшить. Поэтому, чем меньше исходный размер зерен в детали, тем больше имеется возможностей обеспечить ей в результате регламентированного роста зерен при термообработке наилучший комплекс механических свойств в соответствии с условиями эксплуатации [15].

Существенным фактором при термообработке детали, изготовленной в условиях СПД, является относительно равномерный рост зерен, обусловленный практическим отсутствием неравномерного деформационного наклепа и анизотропии структуры, что позволяет соответственно получать изделие с однородной крупнозернистой структурой и изотропными механическими свойствами.

Наличие исходной микрокристаллической структуры, а также низкая теплопроводность жаропрочных сплавов позволяют также применять так называемую дифференцированную термообработку крупногабаритных деталей типа дисков. При такой термообработке диск подвергают градиентному нагреву. В результате рост зерен в его различных частях регламентируется, и формируется оптимальная для температурно-силовых условий эксплуатации этих частей микроструктура [10].

В случае дисков из титановых сплавов наилучшему комплексу их свойств, согласно [11,12], отвечают глобулярная и глобулярно-пластинчатая структуры. На рис. 5 приведены сравнительные данные по ряду свойств двухфазного титанового сплава ВТ9 после СПД и традиционной обработки. Видно, что обработанный в условиях сверхпластичности сплав имеет более высокий уровень прочностных, пластических и усталостных свойств. При умеренных температурах мелкозернистые сплавы демонстрируют также и повышенные длительные свойства. Следовательно, использование сплавов с микрокристаллической структурой и условий сверхпластической деформации не только улучшает технологичность сплавов при обработке давлением, но и придает деталям более высокие механические свойства.



**Рис. 5.** Механические свойства сплава ВТ9 с исходной глобулярной микроструктурой после традиционной обработки и СП деформации

*Ультразвуковой контроль.* Акустический, в частности ультразвуковой, контроль, как известно, является чувствительным методом обнаружения несплошностей в материалах. Он основан на исследовании процесса распространения упругих колебаний в материале проверяемой детали. При отсутствии несплошностей генерируемые излучателем акустические волны распространяются в контролируемом материале прямолинейно в виде расходящегося пучка. При нарушении сплошности происходит отражение, преломление и рассеяние волн. УЗК является обязательной операцией проверки деталей ответственного назначения, требует весьма ответственного подхода к её проведению и достаточной квалификации специально подготовленного для этого персонала.

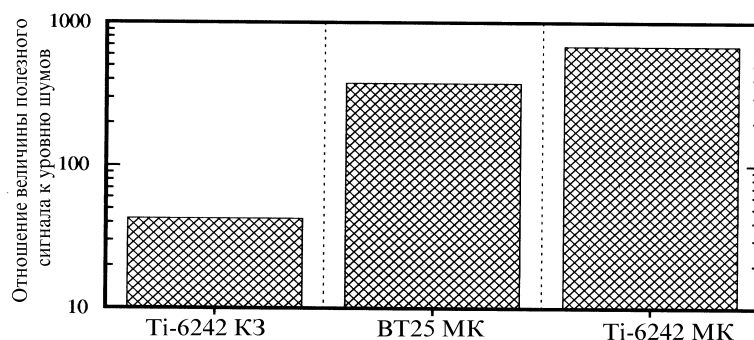
Практика УЗК изделий, изготовленных из титановых и никелевых сплавов обычными методами горячей деформации и, как следствие, обладающих неоднородностью структуры, отличается повышенным уровнем акустических шумов, ограничивающих чувствительность этого метода [13]. Причем предельная чувствительность может меняться не только от заготовки к заготовке, но и от участка к участку в пределах одной заготовки. Высокий уровень шумов ведет либо к неоправданной отбраковке изделия, обусловленной наличием сигнала от тех или иных допустимых структурных неоднородностей, которые идентифицируются как недопустимый дефект, либо, наоборот, такой дефект может быть не замечен вследствие его маскировки шумами.

В настоящее время УЗК изделий ответственного назначения из жаропрочных никелевых и титановых сплавов проводится с чувствительностью, обеспечивающей обнаружение в нем плоскодонного отражателя (искусственного дефекта) диаметром 0,8 мм.

Существенное преимущество использования деталей и полуфабрикатов с мелкозернистым строением связано с их УЗК. Установлено [13], что в титановых сплавах с глобулярной структурой характерные изменения линейных размеров её составляющих не вызывают заметных изменений акустических характеристик при УЗК. К аналогичным эффектам приводит также измельчение и укрупнение зерен и в жаропрочных никелевых сплавах. По данным, приведенным в вышеотмеченной работе, рост зерен с 20 мкм до 150 мкм в зависимости от применяемого типа преобразователей и частоты звука снижает чувствительность УЗК в 2-6 раз.

Используя методику плоскодонного отражателя, в работах [7,14] было выполнено сравнение способности к выявлению дефектов в образцах, вырезанных из раскатанного диска из сплава ВТ25 с микрокристаллической структурой и из титанового сплава Ti 6242. В одном из образцов из Ti 6242 структура была также однородной микрокристаллической, а в другом - неоднородной, пластинчатой. Эффективность УЗК изделий с глобулярной микрокристаллической структурой по сравнению с крупнозернистой пластинчатой структурой можно наглядно оценить по величине отношения уровня полезного сигнала к уровню шумов, которая для сравниваемых структурных состояний более чем вдвое выше у микрокристаллических сплавов (рис. 6).

Кроме того, уменьшение размера зерен повышает вероятность выявления дефектов, соизмеримых с ними по размеру, т.к. чем меньше размеры зерен, тем меньше размер дефекта, который может быть выявлен УЗК. Другой благоприятной особенностью для УЗК деталей, полученных в состоянии СПД, является увеличение их проницаемости акустическими волнами, что позволяет проводить измерение более толстостенных изделий с высоким качеством (на отсутствие неоднородности по химическому составу, деформационным зонам, текстуре).



**Рис. 6.** Уровень отраженного дефектом сигнала по отношению к шумам в пластинчатой структуре в сплаве Ti-6242 (слева) и в микрокристаллических структурах в том же сплаве (справа) и в сплаве BT25 (центр). КЗ- крупнозернистая, МК – микрокристаллическая структуры [14]

### Заключение

Таким образом, формирование в жаропрочных сплавах микрокристаллической структуры позволяет осуществлять их деформирование в условиях сверхпластичности и тем самым кардинально изменять их физико-механические и технологические свойства. После формирования такой структуры малопластичные и труднодеформируемые по природе сплавы, в частности, литейные, становятся легкодеформируемыми и высокопластичными. При этом не только расширяется температурно-скоростная область обработки давлением этих сплавов, что облегчает выдерживание режима деформации, но, что весьма важно, перестает играть роль неизбежное неоднородное распределение деформации в пределах детали. Изделия после СПД имеют однородную структуру и изотропные механические свойства. Кроме того, микрокристаллическая структура обеспечивает сплавам высокую чувствительность ультразвукового контроля, что позволяет уверенно прогнозировать работоспособность детали в пределах заданного ресурса её эксплуатации. Важным достоинством материалов с однородной микрокристаллической структурой является возможность управлять рядом механических свойств материалов, зависящих от размера зерен, используя для этого регламентированный рост зерен при термообработке.

### Список литературы

1. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: microstructural refinement and superplastic roll forming. - Arlington, Virginia, USA: Futurepast, 2005. – 386 p.
2. Ротационный метод и стан для изготовления дисков газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов / Ф.З. Утяшев, Р.Ю. Сухоруков, В.Л. Афонин, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. - № 1. - С. 109-116.
3. Степанов Ю.Ф., Баландин Г.Ф., Рыбкин В.А. Технология литейного производства. – М: Машиностроение, 1983. - 287 с.
4. Исследование технологических режимов штамповки заготовок из высокопрочного чугуна / Г. А. Салищев, Н.И. Бех, В.А. Валитов, Ш.Х Мухтаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. - № 1. - С. 2-5.
5. Valitov V.A., Utyashev F.Z., Mukhtarov Sh.Kh. Formation of microcrystalline structures and superplastic properties of nickel based alloys // Materials Science Forum. – 1999. - V. 304-306. -P. 79-84.
6. Соколов В.К. Текстурное совершенствование эксплуатационных свойств материалов // Новые перспективные материалы и новые технологии / - Екатеринбург: УрО РАН, 2001.
7. Superplastic roll forming of Ti alloys / B.P. Bewlay, M.F.X. Gigliotti, F.Z. Utyashev, O.A. Kaibyshev // Materials and Design. – 2000. – V. 21. – P. 287-295.

8. Палиенко Е.Я., Погребняк А.Д., Ищенко И.И. Об оценке характеристик структуры и прочности жаропрочного никелевого сплава с учетом температурно-скоростных условий // Проблемы прочности. – 1981. - № 10. С. 55-59.
9. Борздыка А.М., Цейтлин В.З. Термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. - М.: Машиностроение, 1964. - 247 с.
10. Pat. No. 3741821 USA, MKI C22F10/1. Processing for integral gas turbine disc/blade component / R.L. Athey, J.B. Moore; filed May 10, 1971; patented June 26, 1973.
11. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун и др. – М: Металлургия, 1975. - С. 519.
12. Брун М.Я., Евменов О.Л., Каганович Н.И. Улучшение структуры заготовок их двухфазных титановых сплавов путем предварительной деформации в  $(\alpha+\beta)$ -области и окончательной обработки при температуре  $\beta$ -области / ТЛС. – 1978. - № 6. -С. 43-47.
13. Исаев А.А., Кузенкова В.П. Взаимосвязь акустических и структурных параметров при ультразвуковом контроле заготовок их титановых и никелевых сплавов // ТЛС. – 1993. - № 4-5. – С. 91-97.
14. M.F.X. Gigliotti, B.P. Bewlay, O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev / The 9<sup>th</sup> World Conf. on Titanium, June 7-11, 1999, St. Petersburg, Russia. – St. Petersburg, 2000. - P. 1581.
15. Научные основы высокоэффективной технологии раскатки осесимметричных деталей ротора газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов. /Проблемы машиностроения и надежности машин., 2013, №5, с. 96-105.