

**О. А. КАЙБЫШЕВ**

## НАУЧНАЯ ШКОЛА ПРОБЛЕМ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**Кайбышев  
Оскар Акрамович**

Доктор технических наук, профессор, академик Академии наук Республики Башкортостан и Российской академии естественных наук.

Окончил МИСиС (1962), там же защитил кандидатскую (1967) и докторскую (1974) диссертации. Трудовую деятельность начал зав. лабораторией рентгеноструктурного анализа УМЗ (1962). Работает в УАИ–УГАТУ с 1967 г. Заведует кафедрой общей технологии и металловедения (с 1969), организовал и возглавил СКТБ «Тантал» (1980) и Институт проблем сверхпластичности металлов АН СССР (РАН) (1986). Президент Академии наук РБ в 1991–94 гг.

Научные интересы в области физики металлов. Автор физической теории сверхпластичности промышленных сплавов, позволившей создать и внедрить принципиально новые процессы формообразования изделий из материалов различной физико-химической природы. Соавтор открытия «Явление образования в поликристаллах неравновесных границ зерен». Опубликовал более 350 работ, в том числе монографии «Высокоскоростная деформация и структура металлов» (М.: Металлургия, 1971), «Пластичность и сверхпластичность металлов» (М.: Металлургия, 1975), «Сверхпластичность промышленных сплавов» (М.: Металлургия, 1984), «Super-Plasticity of Alloys, Intermetallides and Ceramics» (Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1992).

Опытный организатор науки и учебного процесса. Подготовил четырех докторов и более трех десятков кандидатов наук. Кавалер ордена Трудового Красного Знамени (1980).

Тел: (3472) 24 64 07 E-mail: imsp@anrb.ru



**В** 1945 году А. А. Бочвар и З. А. Свидерская опубликовали статью о сверхпластичности сплава  $Zn-22\%Al$ , где описали необычно высокую пластичность этого материала [1]. Поскольку ранее было известно подобное поведение эвтектики системы  $Pb-Sn$  [2], то данное явление А. А. Бочвар предложил назвать сверхпластичностью (СП), что стало общепринятым термином в мировой литературе.

Суть явления состоит в следующем: в процессе деформации наблюдается огромная деформация материала без разрушения (на 1000 и более процентов) и не наблюдается его упрочнение (рис. 1). Последующие исследования показали, что имеется высокая скоростная чувствительность как напряжения течения, так и относительного удлинения.

Было высказано много гипотез относительно как причин, вызывающих это явление, так и природы достижения столь огромных деформаций. Реальный прогресс в понимании сути явления наметился в конце 60-х годов, поскольку появились возможности исследования структуры материалов современными дифракционными методами. Тем не менее понадобились десятилетия исследований для понимания как природы явления, так и возможности его использования на практике.

Для фундаментального исследования этого явления и разработки новых малоотходных и энергосберегающих технологий на его основе в Уфимском авиационном институте была создана Отраслевая лаборатория сверхпластичности металлов, которая затем переросла в Специальное конструкторско-технологическое бюро «Тантал». В 1986 году в Уфе был создан первый в мире академический институт – Институт проблем сверхпластичности металлов РАН.

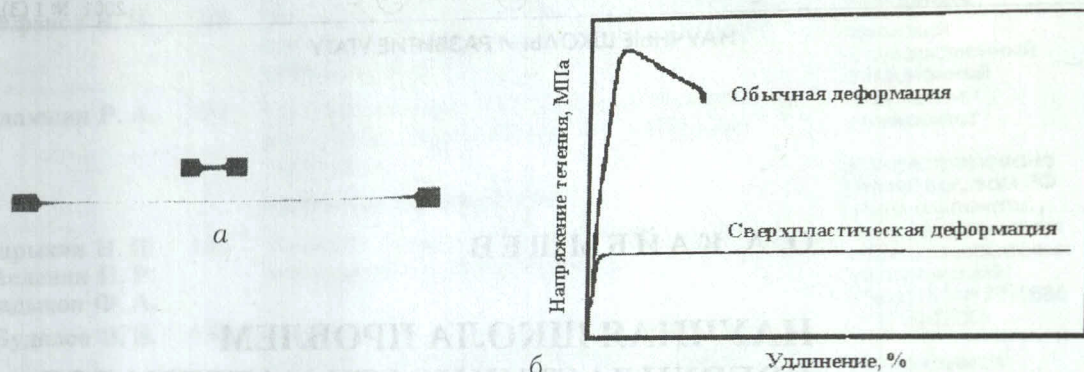


Рис. 1. Сверхпластичность сплава Zn-22%Al: а — образцы до и после СП деформации ( $\delta = 2100\%$ ); б — типичные кривые  $\sigma$ - $\epsilon$  для обычной и СП деформации

Рассмотрим некоторые важнейшие результаты, полученные в области фундаментальных исследований явления СП, и возможности использования обработки в условиях СП, для получения высоких физико-механических свойств в материалах.

### 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДЫ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

К настоящему времени доказано, что основными факторами, определяющими переход металлов и сплавов к СП течению, являются размер зерен, структура границ зерен и температурно-скоростные условия деформации ( $T = 0,5 - 0,6T_{пл.}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ ). Считается, что для металлов и сплавов для реализации эффекта сверхпластичности необходимо формирование микроструктуры с размером зерен менее 10 мкм [3, 4]. Например, на сплаве Zn-0,4%Al при размере зерен  $d$  менее 10 мкм зависимость  $\sigma_{0,2}$  от  $d$  подчиняется соотношению Холла-Петча, в соответствии с которым  $\sigma \sim d^{-1/2}$  (рис. 2). Однако в области крупных зерен зависимость предела текучести изменяется: наблюдается снижение  $\sigma_{0,2}$  с уменьшением  $d$ . По мере измельчения микроструктуры изменяется и пластичность сплава. Если в крупнозернистом сплаве относительное удлинение до разрушения  $\delta \approx 2\%$ , то при измельчении зерен от 10 до 1 мкм  $\delta$  возрастает от 25 до 400%; одновременно появляется и характерный для сверхпластической деформации S-образный вид зависимости напряжения течения от скорости деформации. Такая закономерность является общей не только для металлов и сплавов при наличии стабильной микроструктуры как при выдержке при температуре деформации, так и в процессе самой деформации, но и для интерметаллидов и керамик, которые обычно относят к природно-хрупким материалам.

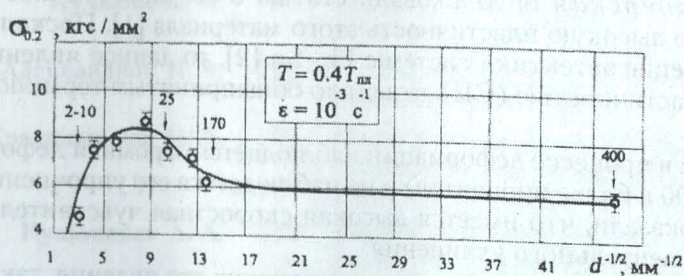


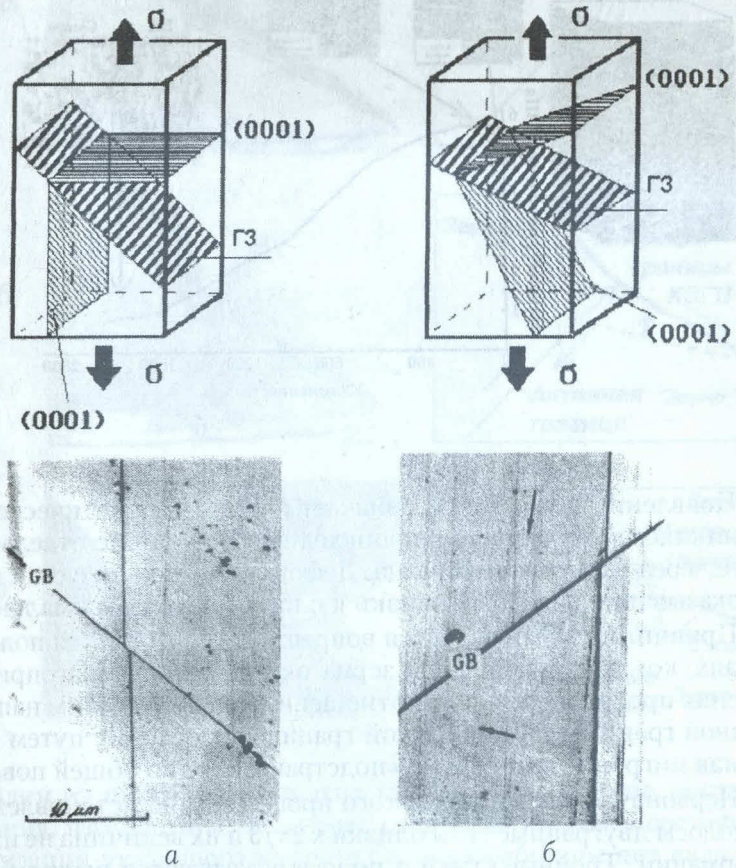
Рис. 2. Зависимость напряжения течения сплава Zn-0,4 Al от величины зерен (относительное удлинение в процентах указано цифрами на графике)

При сверхпластической деформации зерна не повторяют деформацию образца: удлинение образца в тысячи процентов оставляет зерна практически равноосными. В этой связи чрезвычайно важно из эксперимента выяснить действие различных механизмов деформации в условиях СП деформации. Систематические исследования [5-7] показали действие трех основных механизмов деформации: зернограничного проскальзывания (ЗГП), внутризеренного дислокационного скольжения (ВДС) и диффузионной ползучести.

При изучении ЗГП в бикристаллах Zn и Cd удалось установить тесную взаимосвязь между параметрами ЗГП и сверхпластической деформации (рис. 3). При этом было показано, что основу механизма ЗГП в бикристаллах составляет процесс взаимодействия решеточных дислокаций

с границей — так называемое «стимулированное» ЗГП. В результате этого взаимодействия изменяется плотность зернограницных дислокаций и движение последних вдоль плоскости границы обеспечивает ускорение скорости ЗГП.

**Рис. 3.** Бикристаллы Zn с границей наклона 90° С [11 20] для изучения «чистого» и «стимулированного» ЗГП (а) и деформационный рельеф и смещение рисок в результате «чистого» и «стимулированного» ЗГП (б); стрелками показано направление тонких линий скольжения



На основе этих представлений были сформулированы физические модели механизма СП деформации [8]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{kT} \left( \frac{\sigma - \sigma_i}{G} \right)^2 \left( \frac{b_b}{d} \right)^2 D_o \exp \left( -\frac{E}{RT} \right),$$

где  $A = \Omega G / (16b^2)$ ;  $E$  — энергия активации зернограницной диффузии;  $G$  — модуль сдвига;  $d$  — размер зерна;  $b_b$  — вектор Бюргера зернограницных дислокаций;  $\sigma$  — приложенное напряжение;  $\sigma_i$  — пороговое напряжение;  $T$  — температура. Это выражение дает зависимости  $\dot{\epsilon} \sim d^2$  или  $\sigma \sim d$ ;  $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\epsilon} = (\sigma - \sigma_i) 2\sigma$  при  $\sigma_i = 0$ ,  $m = 0$ , что хорошо соответствует экспериментальным данным 2-й стадии кривой  $\sigma = f(\dot{\epsilon})$ .

Однако понимание только микромеханизма сверхпластической деформации не позволяет создать общую теорию явления, для этого необходимо проведение исследований на мезо- и макроуровнях.

Изучение деформационного рельефа на специально подготовленных образцах с использованием методик прицельной съемки показало, что при сверхпластической деформации отсутствует однородность течения на мезоуровне: в объеме образца формируются деформационные полосы. Была установлена корреляция между изменением свойств и появлением полос (рис. 4) и доказано, что деформация осуществляется посредством согласованного сдвига вдоль поверхностей, проходящих через все поперечное сечение образца и предельно близких к плоскостям с максимальными сдвиговыми напряжениями. Эти поверхности были названы полосами кооперированного зернограницного проскальзывания (КЗГП) [9].

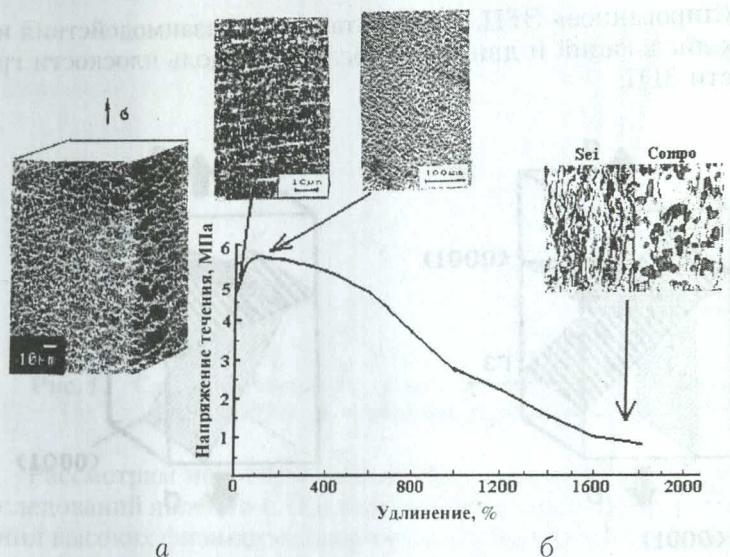


Рис. 4. Формирование деформационных полос в объеме образца (а) и их развитие в процессе растяжения (б)

Появление полос КЗГП означает переход к пластической деформации. При достижении стадии стабильного течения происходит объединение отдельных полос в поверхности, проходящее через все сечение образца. Деформация локализуется вдоль этих поверхностей, причем они оказываются наиболее близки к плоскостям с максимальными сдвиговыми напряжениями.

Принципиальным является вопрос: как формируется полоса КЗГП на микроуровне? В тех случаях, когда часть границы зерна оказывается неблагоприятно ориентирована для осуществления проскальзывания по отношению к действующим напряжениям, передача деформации от одной границы зерна к другой границе происходит путем ВДС. Другая возможность — локальная миграция границ и их «подстраивание» по общей поверхности.

Первоначально действие этого процесса было установлено статистически. Оказалось, что вне полосы двугранные углы близки к  $2\pi/3$  и их величина не изменяется с увеличением степени деформации. Тройные стыки в полосе оказываются выпрямленными, с увеличением степени деформации их величина становится больше  $2\pi/3$  и стремится к  $\pi$ . По выпрямлению границ вдоль полос КЗГП оказалась возможной их идентификация не только на поверхности, но и в объеме образцов [10].

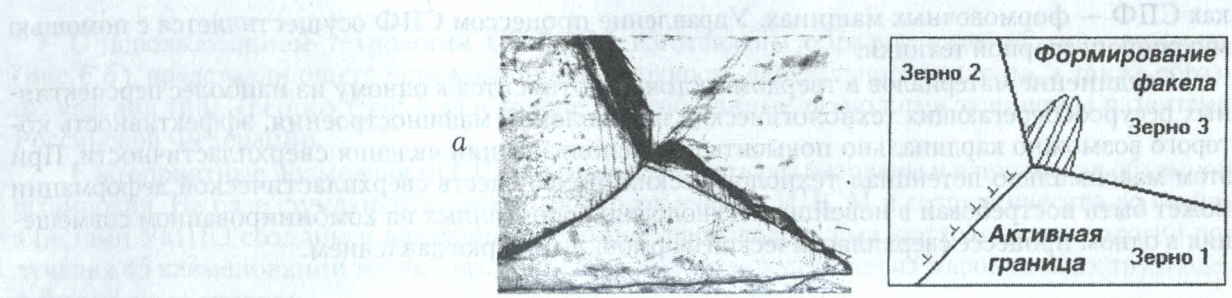
Прямые доказательства подстраивания границ зерен при деформации были получены при изучении деформации трикристаллов Al (рис. 5). Экспериментально было показано, что имеются, по крайней мере, две возможности образования полос: 1) образование скопления зернограничных дислокаций, развитие дальнейшей деформации за счет движения решеточных дислокаций и последующая миграция неблагоприятно ориентированных для проскальзывания границ и 2) миграция тройного стыка. В результате становится возможным развитие кооперированного зернограничного проскальзывания по двум границам трикристалла. Такое изменение ориентировки границ было названо самоорганизацией деформационного проскальзывания. Этот процесс играет наиважнейшую роль в обеспечении СП течения.

## 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

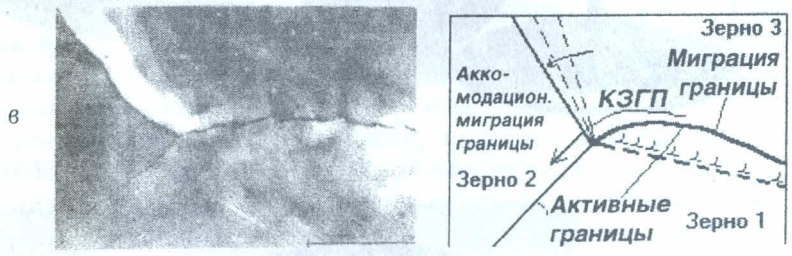
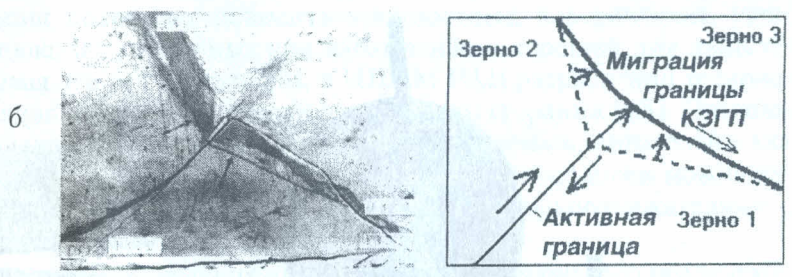
Формообразование изделий в режиме сверхпластичности позволяет существенно расширить технологические возможности по сравнению с использованием обычной деформации. При этом преимущества достигаются за счет резкого, на порядок и более, снижения деформирующих усилий, практически неограниченного запаса пластичности, отсутствия наклепа, получения однородной микроструктуры и свойств после деформации.

Рассмотрим ряд конкретных примеров реализации технологических процессов, основанных на эффекте сверхпластичности.

Одно из неоспоримых преимуществ сверхпластичности было показано на примере получения твердофазным методом волокнистых композитов с металлической матрицей. Наиболее существенная проблема композитов заключается в деградации и разрушении упрочняющих волокон на стадии получения композита в результате термического и химического воздействия



**Рис. 5.** Кооперированное зернограничное проскальзывание в трикристаллах Al: а – формирование факела; б – подстраивание границы путем миграции; в – миграция границы



со стороны материала матрицы. Один из путей решения этих проблем – снижение температуры и напряжений компактирования, что достигается за счет сверхпластического состояния материала матрицы. С целью реализации указанного эффекта были разработаны два вида полуфабрикатов и способы их получения [11, 12]. Для обеспечения равномерного распределения упрочняющих волокон с заданным шагом укладки разработан метод получения тканых сеток из непрерывных волокон любого типа, переплетенных проволокой из материала матрицы. Второй вид полуфабриката представляет собой фольги и листы из матричного материала толщиной около 0,1 мм. Путем изотермической прокатки листов в режиме сверхпластичности были получены тонкие листы из труднодеформируемых алюминиевых, титановых и интерметаллидных материалов с микронным и субмикронным размером зерен с высокими эксплуатационными свойствами.

Показательным примером конкретной реализации эффекта сверхпластичности является также и технология сверхпластической формовки (СПФ) – способ формоизменения листовой заготовки из сверхпластичного материала [13]. Основными материалами служат сплавы алюминия, титана, а также нержавеющие стали. Технология СПФ не требует дорогостоящих взаимносопряженных штампов. Применение СПФ эффективно для изделий сложной формы, больших размеров, имеющих точно воспроизводимые криволинейные поверхности, такие как панели обшивки самолета, рефлекторы радара. Издержки при изготовлении таких изделий СПФ за одну формообразующую операцию перекрывают затраты, связанные с традиционной многопереходной штамповкой с обязательной механической обработкой.

Решающим фактором успешной разработки процессов СПФ изделий сложной формы является создание расчетных моделей. В этой связи успешное применение находит метод конечных элементов (МКЭ). Так, на основе численных исследований [14] определены особенности формообразования ячеистого наполнителя и режимы деформирования, которые явились базой для изготовления многослойных ячеистых конструкций различной геометрии.

Гибкость технологии СПФ проявляется в подходе к выбору оборудования. Изделия малых размеров получают, используя штамповую оснастку простой конструкции, в вакуумных или обычных печах. Крупногабаритные изделия изготавливают на специализированных установ-

ках СПФ — формовочных машинах. Управление процессом СПФ осуществляется с помощью микропроцессорной техники.

Соединение материалов в твердом состоянии относится к одному из наиболее перспективных ресурсосберегающих технологических направлений машиностроения, эффективность которого возможно кардинально повысить при использовании явления сверхпластичности. При этом максимально потенциал технологических преимуществ сверхпластической деформации может быть востребован в новейших технологиях, основанных на комбинированном совмещении в одном процессе сверхпластической формовки и сварки давлением.

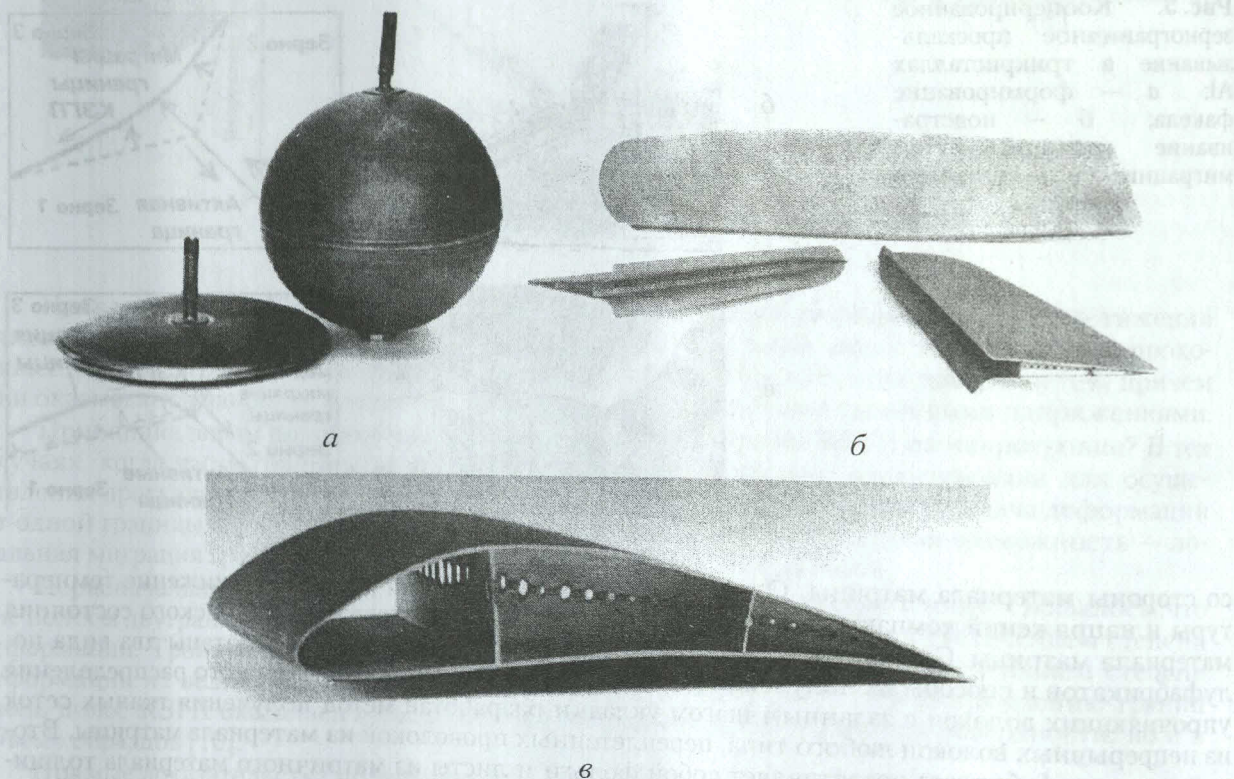


Рис. 6. Детали типа «шаробаллон»  $\varnothing 190$  мм и исходная заготовка из титанового сплава ВТ6С (а), типа «панель» ( $330 \times 100$  мм) из титанового сплава ВТ6С (б) и типа «ребро» ( $890 \times 160$  мм) из титанового сплава ВТ14 (в), изготовленные по технологии СПФ/СД

Примером разработки уникальной технологии СПФ/СД является изготовление сферического сосуда давления из пакета листовых заготовок титанового сплава ВТ6С (рис. 6, а) [13]. Традиционная технология изготовления таких изделий, включающая штамповку полусфер, механическую обработку и их электронно-лучевую сварку, отличается высокой трудоемкостью. Грубая пластинчатая структура шва, полученная в результате сварки плавлением, сильно отличается от микроструктуры основного материала, что представляет критичным для сильно нагруженных конструкций из титановых сплавов, работающих в условиях криогенных температур. Использование явления сверхпластичности позволило разработать новую технологию изготовления изделия «шаробаллон» из пакета листовых заготовок сплава ВТ6С, соединенных сваркой давлением. За счет этого удалось решить проблему достижения изотропности структуры и свойств зоны соединения и основного материала, снизить разнотолщинность, свести к минимуму механическую обработку.

Изготовленные по технологии СПФ/СД «шаробаллоны» успешно выдержали контрольные испытания. При натурных испытаниях на определение разрушающего давления разрушение «шаробаллона» диаметром 190 мм произошло при достижении внутреннего давления жидкости 64 МПа, что на 6% превышает расчетные значения разрушающего давления для монолитного изделия без сварного соединения.

С использованием технологии СПФ/СД изготовлены образцы изделий типа «панель» (рис. 6, б), представляющего управляющую поверхность летательного аппарата, а также образцы изделий типа «ребро» (рис. 6, в) и другие. Разработанные технологии защищены патентами Российской Федерации.

Благоприятные возможности СП течения могут быть реализованы и в процессах объемной штамповки. На базе фундаментальных разработок ученых ИПСМ и сотрудничества со специалистами УМПО созданы и внедрены в серийное производство малоотходные технологии получения 45 наименований точных штампованных заготовок деталей из жаропрочных труднодеформируемых сплавов.

Сверхпластическая деформация позволяет повысить прочностные, пластические, усталостные свойства силуминов, широко используемых при изготовлении поршней для двигателей внутреннего сгорания. Учитывая эти обстоятельства, в ИПСМ РАН разработали технологический процесс изготовления поршней для двигателей внутреннего сгорания [15]. Опытно-промышленные партии поршней были изготовлены для серийно выпускаемых двигателей и для перспективных двигателей нового поколения. Оказалось, что по данной технологии можно изготавливать крупногабаритные поршни диаметром до 400 мм, поршни с кольцедержателями, с керамическими и металлическими накладками.

Качественно новым процессом для изготовления дисков, в котором полностью реализуются возможности СП деформации, является метод локального формообразования [16, 17]. Суть метода состоит в том, что нагретая деталь приобретает заданную форму в процессе вращения под воздействием роликов. Вращая заготовку и смещая ролик по определенному закону, можно получить детали сложной формы, которые невозможно получить известными методами штамповки. Благодаря локализации и особенностям СП деформации, требуемое деформационное усилие резко уменьшается в 500–1000 раз по сравнению с обычной штамповкой. Поскольку при сверхпластической деформации структура не зависит от степени деформации, неравномерное распределение напряжений и соответственно деформаций не приводит к негативным последствиям, в частности, к разнотекстурности, характерной для обычной деформации. Проведенные экспериментальные работы на стане СРД-800 показали возможность изготовления дисков заданных размеров из алюминиевых, жаропрочных титановых и никелевых сплавов (рис. 7).

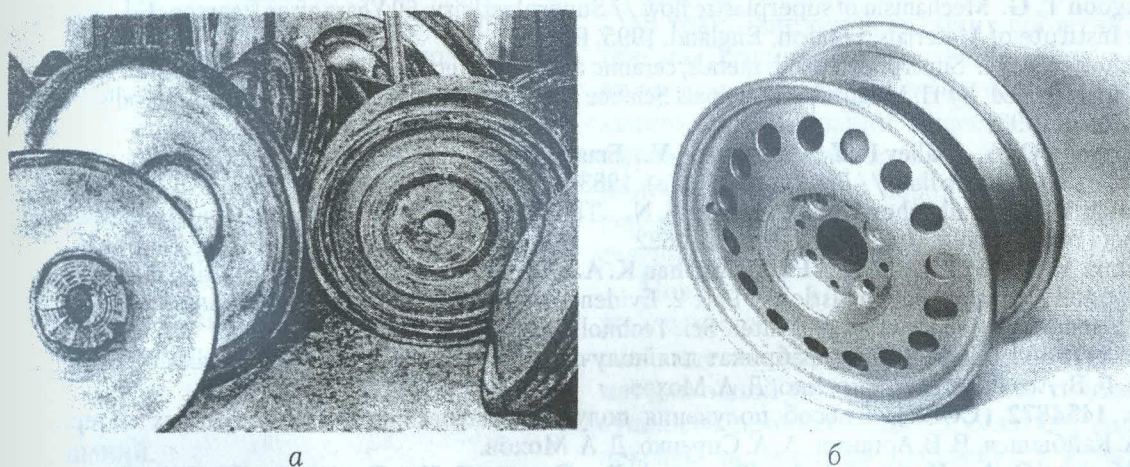


Рис. 7. Детали, полученные раскаткой: диски ГТД (а); автомобильные колеса (б)

В ИПСМ в течение более 10 лет проводятся исследования влияния сверхпластической деформации и формирования субмикроструктурной структуры на комплекс физико-механических свойств магнитных материалов. Результаты исследований показывают, что обработка в СП состоянии позволяет существенно повысить как магнитные свойства, так и, в особенности, механические свойства магнитных материалов. При этом важно, что, наряду с увеличением прочностных свойств, удается увеличить пластичность этих материалов при комнатной температуре до  $\delta = 1 \div 3\%$ . Этого во многих случаях оказывается достаточно, чтобы использовать эти природно-хрупкие материалы в изделиях, где важна конструкционная прочность.

Успешная реализация процессов изготовления высокоресурсных изделий из труднодеформируемых материалов в условиях СП существенно зависит от выбора технологического сма-

зочного материала (ТСМ). При этом создание ТСМ для процессов СП деформации — крупная технологическая проблема, поскольку условия СП (давление, температурно-скоростной интервал) не соответствуют диапазонам типовых процессов горячего деформирования, вследствие чего имеющиеся ТСМ малоэффективны при использовании в процессах сверхпластической деформации. В этой связи были проведены исследования эффективности и деформационного поведения смазок — покрытий, у которых температурно-скоростные параметры деформации близки к режимам сверхпластичности. Исследования структуры и деформационного поведения электроосажденных покрытий из различных сплавов при различных температурно-скоростных условиях показали, что покрытия деформируются в условиях сверхпластического течения с реализацией типовых механизмов СП. На основе комплексной методики получили дальнейшее развитие работы по созданию новых рецептур смазочных материалов в условиях «контактной» СП, что позволило реализовать преимущества сверхпластичности в обычных технологических процессах ОМД, а также разработать новые принципы получения смазочных материалов и обеспечить их реализацию в широком диапазоне температур и скоростей деформаций.

В рамках данного обзора невозможно осветить все интересные результаты и работы, выполненные в области сверхпластичности. Здесь приведены лишь важнейшие данные, главным образом, полученные в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН. Однако и сегодня, когда феноменология и механизмы деформации сверхпластического течения исследованы и понятны достаточно хорошо, многие особенности этого явления требуют дальнейших исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бочвар А. А., Свидерская З. А.** Сверхпластичность сплава Zn-22%Al // Изв. АН СССР. ОНТ. 1945. № 9. С. 821–824.
2. **Pearson С. Е.** The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin // J. Inst. Metals. 1934. V. 54. P. 111–124.
3. **Кайбышев О. А.** Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
4. **Кайбышев О. А.** Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
5. **Kaibyshev O. A.** Superplasticity of alloys, intermetallics, and ceramics. Berlin–New York: Springer–Verlag, 1992. 317 p.
6. **Langdon T. G.** Mechanism of superplastic flow // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. by N. Ridley. The Institute of Materials, London, England, 1995. P. 9–24.
7. **Mucherjee A. K.** Superplasticity in metals, ceramic and intermetallic // Plastic Deformation and Fracture of Materials. Ed. by H. Mughrabi. Materials Science and Technology. V. 6. VCR Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1993.
8. **Kaibyshev O. A., Valiev R. Z., Astanin V. V., Emaletdinov A. K.** The nature of grain boundary sliding and the superplastic flow // Phys. Stat. Sol.(a). 1983. V. 78. P. 439–448.
9. **Astanin V. V., Kaibyshev O. A., Faizova S. N.** The role of deformation localization at superplastic flow // Acta metall. 1994. V. 42, No 8. P. 2617–2622.
10. **Astanin V. V., Faizova S. N., Padmanabhan K. A.** Model for grain boundary sliding and its relevance to optimal structural superplasticity. Part 2. Evidence for cooperative grain/interphase boundary sliding and plane interface formation // Mater. Sci. Technol. 1996. V. 12, June. P. 489–494.
11. **А. с. 1478642 (СССР).** Полуфабрикат для получения композиционных материалов / О. А. Кайбышев, В. В. Астанин, А. А. Сиренко, Д. А. Мохов.
12. **А. с. 1454872 (СССР).** Способ получения полуфабрикатов для композиционных материалов / О. А. Кайбышев, В. В. Астанин, А. А. Сиренко, Д. А. Мохов.
13. **Кайбышев О. А., Круглов А. А., Таюпов А. Р., Бердин В. К., Лутфуллин Р. Я.** Сверхпластическая формовка многослойных конструкций // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 9. С. 20–21.
14. **Kaibyshev O. A.** Application of a numerical model for the optimization of superplastic metal forming // Proc. of 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Industrials Forming Processes Numiform'89. A. A. Balkema / Rotterdam / Brookfield / 1989. P. 477–480.
15. **Трифонов В. Г.** Штамповка поршней двигателей внутреннего сгорания // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 1. С. 12–15.
16. **Пат. 2119842 (РФ).** Способ изготовления осесимметричных деталей и способ получения заготовок для его осуществления (варианты) / Ф. З. Утяшев, О. А. Кайбышев, В. А. Валитов. Положит. решение предварит. междунар. экспертизы по РСТ заявкам RD-25654, RD-25749.
17. **Пат. 2134175 (РФ).** Стан для изготовления осесимметричных деталей / Ф. З. Утяшев, О. А. Кайбышев, В. А. Валитов. Положит. решение предварит. междунар. экспертизы по РСТ заявке RD-25873.