

Тиксоформирование фасонных деталей из алюминиевых сплавов

© Б.И. Семенов, Бинь Нго Тхань, А.Б. Семенов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены фундаментальные принципы и критерии новой парадигмы формирования кристаллического строения сложных фасонных заготовок методами литья и обработки давлением — принципы тиксоформирования. Проанализированы результаты практического использования новых принципов формообразования деталей из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов методами тиксоштамповки и изотермического прессования.

Ключевые слова: тиксоформирование, высокопрочные алюминиевые сплавы, фидстоки, штамповки, микроструктура, свойства.

Несмотря на то, что представления о кристаллическом строении отливок и слитков, берущие начало от работ Д.К. Чернова, развиваются материаловедами уже около 150 лет, для технологов проблема управления формированием структуры фасонных изделий не стала менее актуальной. После работ Б. Мандельброта, автора идеи о фрактальной геометрии природы, очевидным явился факт, что дендриты — это фрактальные объекты (рис. 1, а), эволюция которых не подчиняется классическим законам переноса: свойства твердожидкой среды зависят от изменяющейся фрактальной размерности растущей фазы. Случайность зарождения и алгоритм роста дендрита, представленный на рис. 1, б, определяют основной набор проблем, возникающих у технолога, так как, огрубляясь в процессе роста, дендрит формирует долгоживущие тонкие жидкие прослойки и изолированные жидкие ячейки [1]. Как известно, такими проблемами являются газоусадочная пористость, микро- и макротрещины, продукты ликвации.

Представление о возможных способах управления процессами, протекающими в формообразующей оснастке в интервале затвердевания сплавов изменило развитие ТНХО-технологий. Группа ученых из Масачусетского технологического университета (США) во главе с профессором М. Флемингом 40 лет назад подарила миру принципиально новую идею управления формированием кристаллического строения отливок — идею, получившую сегодня обобщающее наименование «тиксоформирование» (Semi Solid Processing, Thixoforming). Под этим термином объединяются тиксо- и реолитье, тиксо- и реоштамповка,

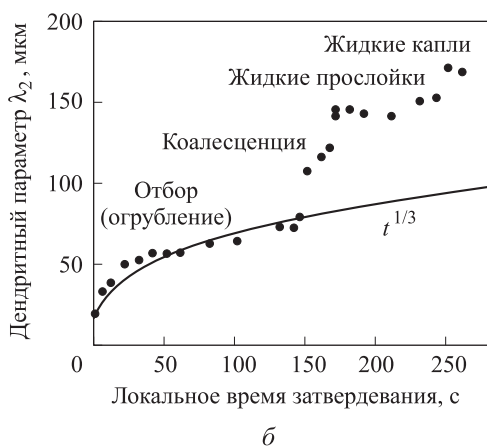
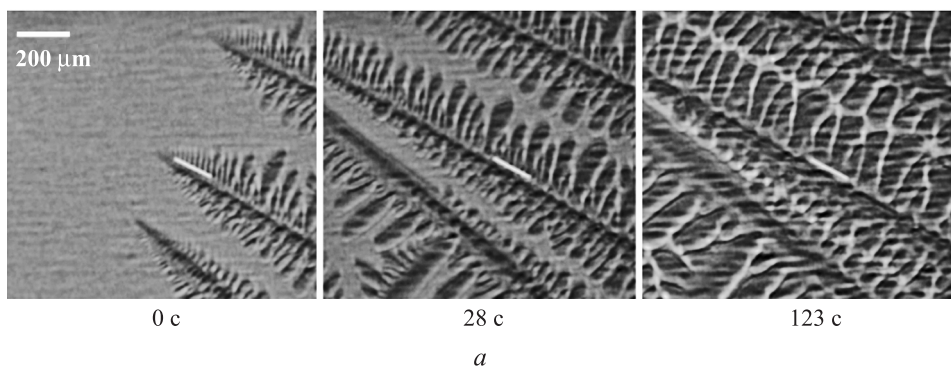


Рис. 1. Огрубление дендритной ячейки при затвердевании (сплав Fe — 0,3 % (вес.) С, скорость охлаждения 0,17 К/с) (а) и алгоритм роста дендритной ячейки (б)

тиксо- и реомолдинг, новое реолитье и др. В практической деятельности машиностроительных фирм происходит «тихая революция» в заготовительных производствах: осуществляется внедрение нового технологического оборудования, способного в условиях массового производства заменить традиционные методы изготовления фасонных заготовок ответственных деталей. Эти методы, коммерциализованные в зарубежном автомобилестроении и электронике в основном на литейных сплавах [2], сегодня уже рассматриваются как новые технологии производства точных отливок и штамповок из высокопрочных алюминиевых сплавов для изделий ракетно-космической техники [3].

На рис. 2, а (данные фирмы Vforge, США) представлены показатели качества новых технологий. По всем изученным показателям тиксоштампованные и реолитые заготовки превосходят заготовки, изготовленные традиционными методами. Одновременно они конкурентоспособны по экономическим показателям (рис. 2, б). Как легко заметить на рис. 2, в, даже такое современное «лекарство» традиционных отливок,

как горячее изостатическое прессование (ГИП), только в одном случае дало результат, приближающий предел усталости сплава АК7 к уровню, регулярно достигаемому в процессе, названном «новое реолитье».

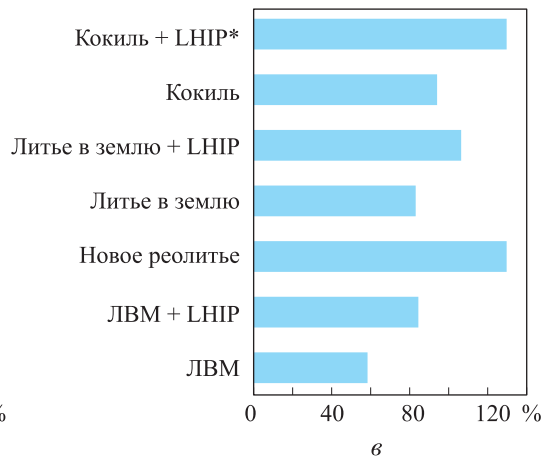
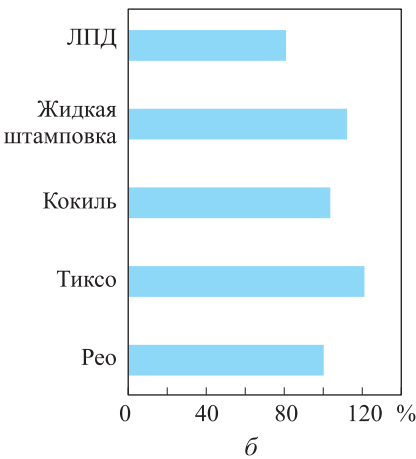
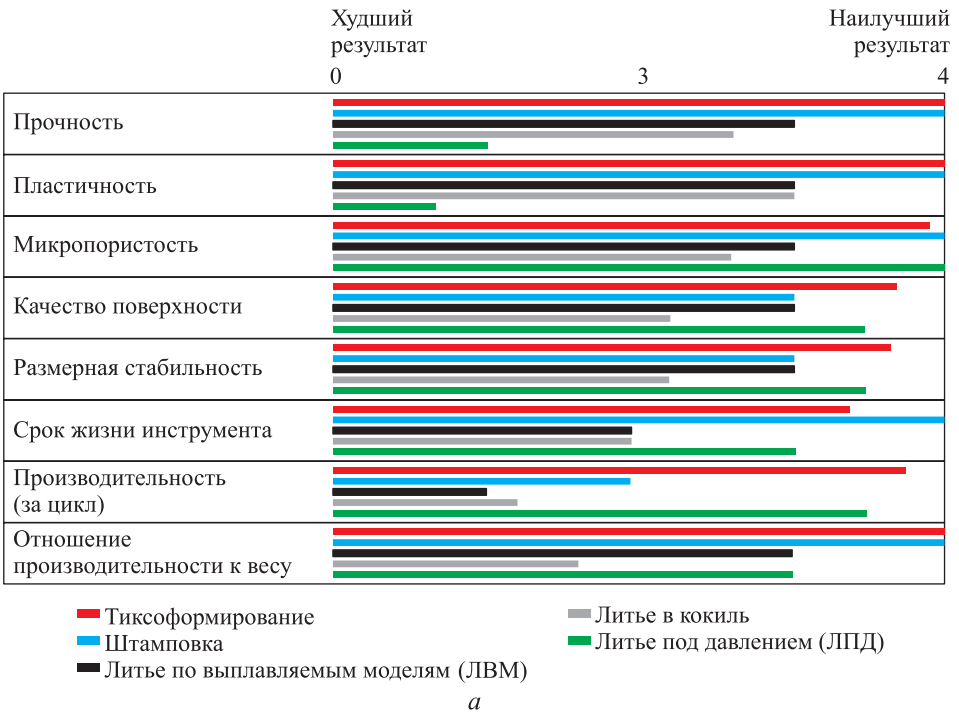


Рис. 2. Преимущества тиксоформирования в сравнении с другими технологическими процессами получения фасонных отливок в баллах (а); относительная стоимость производства фасонной заготовки, % [4] (б); относительная усталостная прочность сплава АК7 в отливке, % [5] (в) (ЛНП — Liquid hot isostatic pressing, горячее изостатическое прессование в жидкости)

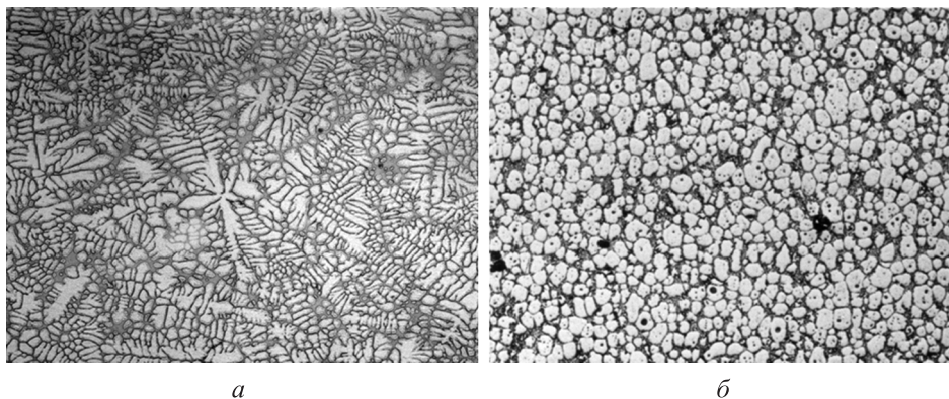


Рис. 3. Типичные дендритная (а) и недендритная (б) литые микроструктуры детали

Очевидно, что тиксоформинг открыл перед производственниками такой потенциал хорошо изученного и освоенного сплава, о котором никто даже не мог предполагать.

Причина новых качеств материала и, как считают специалисты, одновременно ключ к тиксоформингу — недендритная структура материала отливки, которая формируется в таком виде еще до попадания металла в формообразующую полость (рис. 3). Научную основу новых технических решений составляет информация о реологических явлениях [6], принудительно или самопроизвольно протекающих в металле в интервале затвердевания сплава в результате целенаправленных статических и динамических механических и тепловых воздействий на твердожидкую среду. Обоснованность разделения процесса на стадии, интервалы рекомендуемых изменений температуры металла, скоростей и интенсивностей сдвиговых деформаций, допускаемых в технологиях тиксоформинга, могут быть проанализированы по схеме, показанной на рис. 4. Множество физических процессов, совокупно называемых затвердеванием отливки, позиционируются во времени и в пространстве в виде трех обязательных стадий, требующих использования специализированного оборудования и организуемых в виде непрерывной или разорванной цепочки событий. На схеме они названы стадией перемешивания, стадией подготовки к формообразованию и собственно формообразованием.

По термомеханическим условиям, характеризующим особенности переработки сплавов в твердожидком состоянии, полезно особо выделить две области (первую и третью фазы процесса):

- *фаза энергичного перемешивания*: данная стадия не всегда явно присутствует в цепи технологического процесса, но все же используется очень часто, когда стремятся получить глобулярные твердые частицы, равномерно распределенные в неотвержденной части металла. При получении

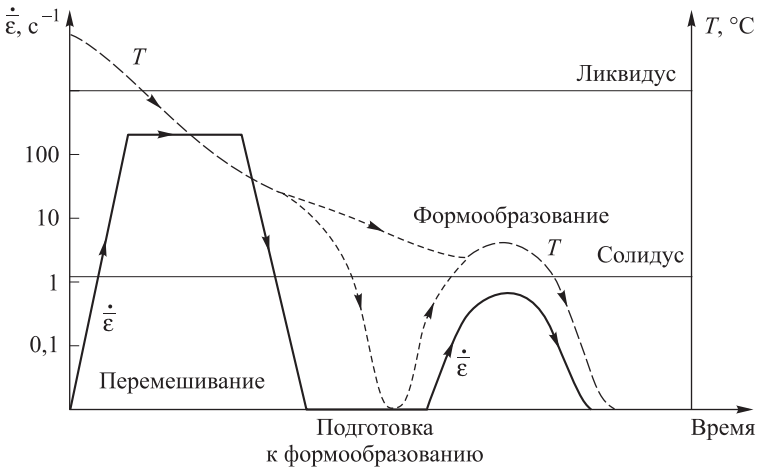


Рис. 4. Схематичное представление рекомендуемых изменений температуры и скорости сдвига на стадии перемешивания металла и на стадии формообразования детали

суспензий из металлов обычно это воздействие реализуется при высоких скоростях $\dot{\epsilon}$ (выше 100 с^{-1}), вызываемых сдвигом вдали от солидуса, в интервале значений температур, примыкающих к ликвидусу с двух сторон в зависимости от доли глобул твердой фазы. Фаза энергичного перемешивания обычно протекает в нестационарных условиях. Этот подход долгое время оставался единственно пригодным для промышленной реализации решением задачи разрушения дендритов и превращения их осколков в глобулы. Значительно позже при получении суспензий была реализована схема теплового разрушения дендритов;

- *фаза формообразования:* на данной стадии использование скорости сдвига заключается в увеличении скорости до максимального значения с последующим снижением до 0. В этой фазе максимальная скорость сдвига (обычно $0,001 \dots 10 \text{ с}^{-1}$) заметно ниже той, что используется на стадии перемешивания. Отсчет температурного интервала стадии формообразования начинается выше солидуса внутри интервала затвердевания, что призвано обеспечить завершение процесса кристаллизацией под давлением; затем температура снижается примерно до комнатной температуры.

Очень важную роль играет стадия подготовки к формообразованию, так как именно она определяет силовые условия начальной стадии формообразования. Удобства (возможность подготовки и транспортировки порции металла как твердого тела) и недостатки (рост сопротивления пластическому течению) связаны с протеканием в суспензии процессов агломерации и деагломерации частиц твердой фазы. Новая идеология структурообразования заставила сформулировать новые критерии при-

годности сплавов к переработке в виде параметров, описывающих физическое состояние суспензии перед началом формообразования, и их целевых значений (табл. 1).

Таблица 1

Критерии пригодности заготовки к тиксоформированию [7]

Параметр	Формула	Целевое значение
Средний диаметр зерен	$\bar{D}_{cp} = f(\dot{T}, c)$	$\bar{D}_{cp} < 100$ мкм
Фактор формы зерна	$F_{\alpha} = \frac{4\pi A}{U^2}$	$F_{\alpha} > 0,6$
Степень скелетизации (относительная длина границ α — α) кристаллов α -фазы в суспензии	$C_{\alpha} = \frac{2S^{SS}}{2S^{SS} + S^{SL}}$	$0,2 < C_L < 0,6$
Степень объемной скелетизации	$V_C = V_S C_L$	$0,1 < V_C < 0,3$
Сдвиговая вязкость	$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$	$\eta \approx 0,001 \dots 0,01$ Па·с
Гранулированная доля твердой фазы в суспензии f_S	$f_S = 1 - \left(\frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right)^{\frac{1}{1-p}}$	40...60 % (масс)
Интервал плавления $\Delta T = T_L - T_S$	$\Delta T = f(c, \dot{T}, p)$	Максимальный — 130 °С, минимальный — 70 °С
Темп изменения доли при 50 % твердой фазы	$\frac{df_S}{dT}$	$< 0,015$
Температурная чувствительность	$Df_S = 0,01 \left(\frac{df_S}{dT} \right) T_{SS}$	$\leq 0,06$
Температурная чувствительность	$\Delta T_{40\dots60}$	> 10 °С

Примечание. η — вязкость; k — константа; $\dot{\gamma}$ — скорость деформации сдвига; n — показатель Освальда де Вейла; \bar{D}_{cp} — средний диаметр зерна; F — фактор формы кристалла (в отечественной практике используется обратная величина); A — площадь поверхности зерна твердой фазы; U — периметр зерна; S^{SS} — общая контактирующая длина границ α -кристаллов в суспензии; S^{SL} — общая контактирующая длина границ α -кристаллов и жидкости в суспензии; p — равновесный коэффициент распределения.

Любая попытка моделирования процесса переработки металла в твердожидком состоянии аналитическими или численными методами требует базовых уравнений, корректно описывающих поведение сплава на всех стадиях твердожидкого состояния, поскольку эти модели должны оказывать необходимую помощь конструкторам промышленного формообразующего оборудования. Вследствие очень сильного взаимного влияния при тиксоформинге ряда параллельно протекающих термомеханических процессов необходимы серьезные исследования для получения экспериментальных данных, позволяющих сформулировать соответствующие уравнения. Например, установлено, что базовые реологические уравнения, определяющие связи между кажущейся вязкостью среды и скоростью сдвига, не могут быть одними и теми же для фазы перемешивания и для фазы формообразования.

Информацию о морфологии твердой фазы, используемую в качестве критериев пригодности, можно получить, анализируя микроструктуру тиксозаготовки, изготовленной выбранным методом, дополняя эту начальную информацию изучением теплофизических и реологических свойств сплава в интервале затвердевания. В качестве примера представим накопленный на кафедре СМ-13 опыт организации информационного потока и последовательность определения критериев пригодности при тиксоштамповке модельной детали «поршень» из литейных (доэвтектический АК7 и заэвтектический АЛ25) и из деформируемых алюминиевых сплавов (В95 и В96Ц3).

В технологической цепочке мы используем схему теплового разрушения дендритов, образующих твердую корочку на водоохлаждаемом желобе и размываемых потоком слегка перегретого металла [8]. Частично расплавляя осколки дендритов, поток переносит готовые зародыши высокого качества в тонкостенный стакан, где организуется их согласованное кооперативное движение, а медленный отвод тепла от стакана способствует объемному затвердеванию и формированию суспензии с глобулярными частицами твердой фазы [3, 8–11]. Процесс достаточно отработан и оптимизирован для получения мерных заготовок массой до 5 кг из литейных алюминиевых сплавов. Вся необходимая информация о структуре материала в момент завершения первой (рис. 5, а, в, г) или второй (рис. 5, б) стадий процесса может быть получена современными компьютерными методами анализа изображений (табл. 2).

Таким образом, полученные методом литья на водоохлаждаемом желобе тиксозаготовки по размерам зерен и морфологическим признакам представляют продукт высокого качества, пригодный для переработки в режимах и тиксо-, и реоформинга. Однако это только начальная оценка по критериям пригодности.

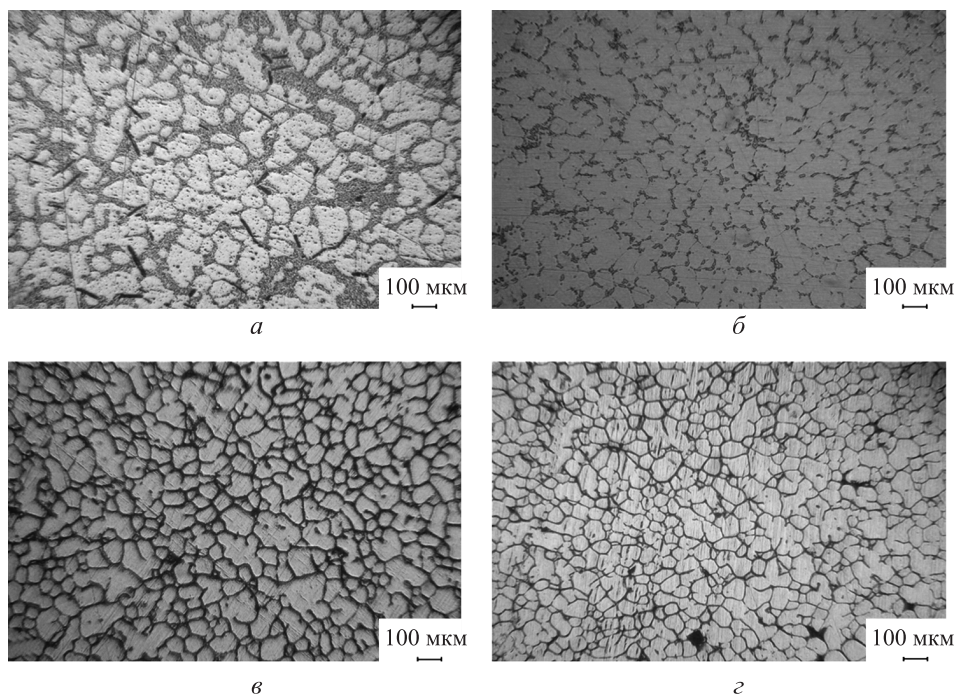


Рис. 5. Микроструктуры фидстоков из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов:

a — АК7; *б* — АЛ25 после повторного нагрева и закалки; *в* — В95; *г* — В96Ц3

Литье тиксозаготовок можно начать, лишь изучив подробную информацию о протекании фазового перехода в планируемом к использованию сплаве. Такую информацию мы получаем из анализа данных дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК) и условий охлаждения сплава в интервале затвердевания. Только совместный анализ этих двух зависимостей позволяет назначить рабочее окно получения тиксозаго-

Таблица 2

Эквивалентный диаметр и фактор формы гранулированных частиц
(параметр F в данной работе определяется как обратное значение параметру, приведенному в табл. 1)

Марка сплава	$\bar{D}_{\text{ср}}$, мкм	F /по [7]
АК7	89,9	1,168/0,856
АЛ25	90,0	1,114/0,898
В95	93,2	1,137/0,880
В96Ц3	70,7	1,115/0,897

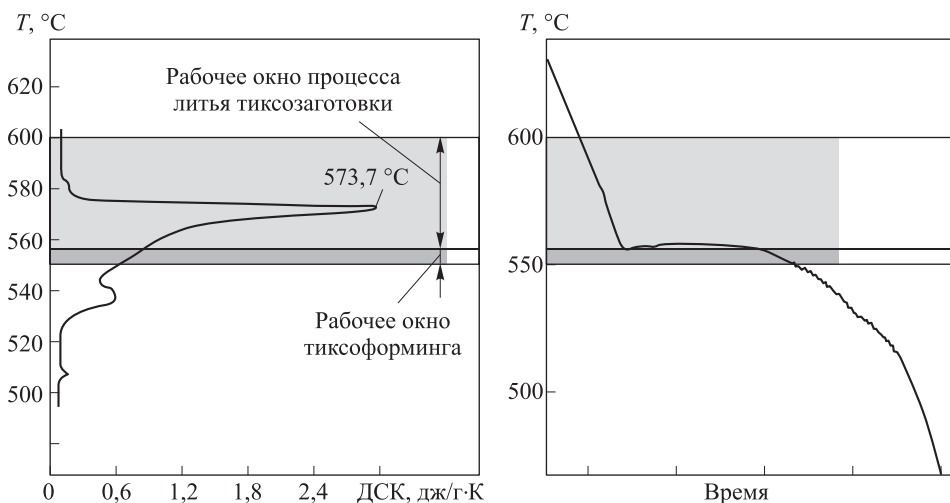


Рис. 6. Кривая ДСК и кривая охлаждения сплава АЛ25

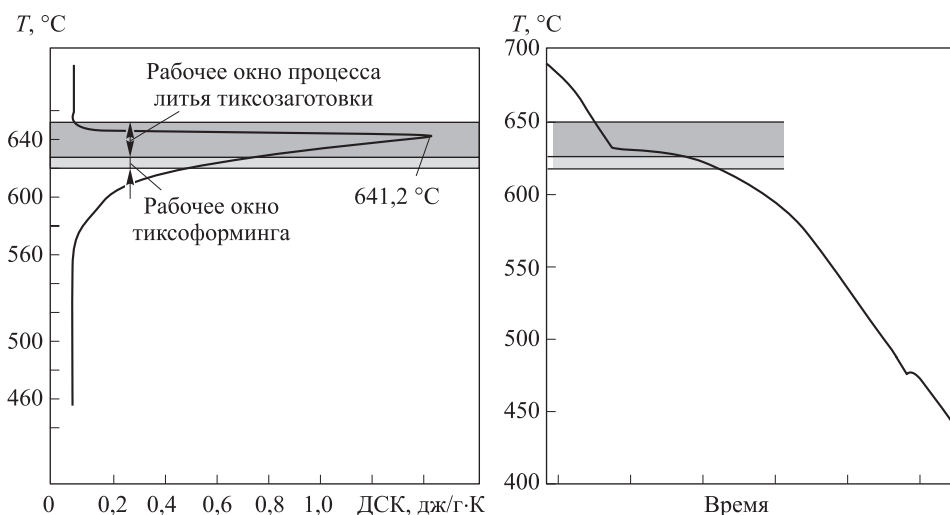


Рис. 7. Кривая ДСК и кривая охлаждения сплава В95

товки* (рис. 6, 7) и рабочее окно тиксоформинга**. Рисунки показывают, насколько эта информация индивидуальна, и насколько она, при внешней схожести кривых, различна у литейных и деформируемых сплавов. У первых рабочее окно литья тиксозаготовки заканчивается около критической для темпа кристаллизации температуры сплава, связанной с естественным прекращением роста кристаллов твердого раствора и началом выделения равновесной эвтектики; у деформируемого сплава В95 — это

* В электронной версии выделено красным цветом.

** В электронной версии выделено желтым цветом.

искусственное прерывание роста кристаллов твердого раствора, приводящее при закалке в воду к кристаллизации неравновесной эвтектики и образованию щелевой пористости по границам гранул. В результате при повторном нагреве (стадия II процесса, рабочее окно тиксоформинга) в правильно подготовленном литейном сплаве формируется металлическая суспензия со стабильной по составу жидкой фазой, в которой при выдержке (называемой в реологии отдыхом суспензии) по классическим закономерностям развиваются процессы агломерации и деагломерации твердых частиц. В тиксозаготовках из высокопрочных сплавов, закристаллизованных в очень неравновесных условиях, в рабочем окне тиксоформинга формируются жидкие прослойки, имеющие состав, не находящийся в термодинамическом равновесии с твердой фазой. Реологические свойства подобных суспензий не изучены, а критерию $df_s/dT < 0,015$ соответствуют только сплавы, имеющие большую долю равновесной эвтектики. По-видимому, по этой причине большинство работ по тиксоформингу деформируемых сплавов (не отвечающих данному критерию) до настоящего времени находятся в мировой практике на стадии исследований, а не коммерциализации. Таким образом, для деформируемых сплавов должен быть установлен дополнительный критерий пригодности и введена дополнительная технологическая операция на стадии получения тиксозаготовки, указывающая путь решения проблемы.

В табл. 3 приведены свойства детали из сплава АК7, тиксоштампованной из заготовок, полученных методом литья в тонкостенный стакан через водоохлаждаемый желоб, повторно нагретых и частично расплавленных до доли твердой фазы около 50 %. Для сравнения приводятся свойства детали, отлитой из литейного сплава 356 (аналог сплава АК7) различными способами: заливкой жидкого металла (кокиль, жидкая штамповка 0 % твердой фазы), заливкой суспензированного металла

Таблица 3

Свойства сплава 356 в отливках после термической обработки

Сплав	Процесс	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
356-T6	Кокиль	283	207	10,0
356-T6	Squeeze	301 ± 45,2	266 ± 6,1	4,2 ± 3,4
356-T6	IDRA SSR	291 ± 6	229 ± 3	10,2 ± 3,9
356-T6	UBE NRC	308 ± 22,6	221 ± 5	15,6 ± 5,5
АК7 Т6	Тиксоштамповка на гидропрессе (юбка поршня)	308 ± 11	257 ± 23	8,5 ± 0,5

(SSRTM (Semi-Solid Rheocasting), доля твердой фазы до 20 %) и методом UBE NRC (New Rheocasting) с долей твердой фазы в суспензии перед началом запрессовки около 50 %. Данные табл. 3 показывают очевидные преимущества и перспективность переработки сплава в суспензированном состоянии при высокой доле твердой фазы.

Работы по тиксоштамповке деформируемых сплавов в нашей стране проводятся впервые, но могут дать очень важные результаты для производства перспективных изделий для ракетно-космической и авиационной техники, других отраслей машиностроения в условиях массового производства. Из алюминиевых сплавов производят фасонные заготовки многих деталей ракетной техники. Примером таких изделий могут быть катушка и рули управления крыльевой блока маршевого двигателя ПЗРК 9К38 «Игла», из высокопрочных алюминиевых сплавов (рис. 8).

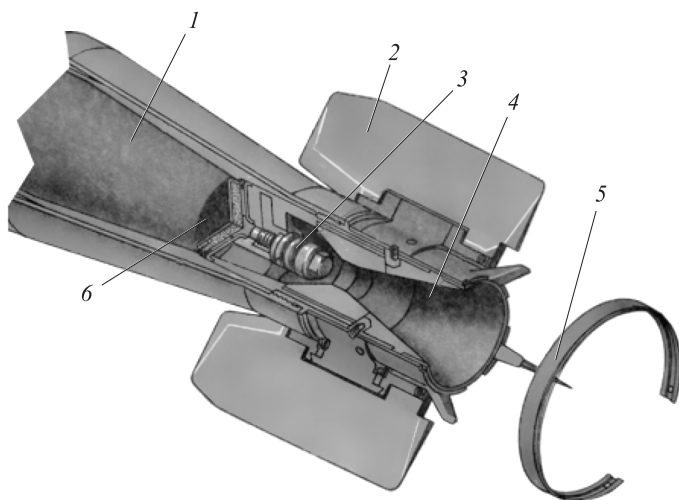


Рис. 8. Детали блока маршевого двигателя ПЗРК 9К38 «Игла», изготовленные тиксоштамповкой [12]:

1 — маршевый заряд; 2 — крыльевой блок; 3 — лучевой воспламенитель замедленного действия; 4 — сопло; 5 — разжимное кольцо; 6 — воспламенитель маршевого заряда

Для исследований, выполняемых в рамках государственного задания (регистрационный номер НИР: 3.1905.2011), выбрана модельная деталь, сложная геометрия которой представлена на рис. 9. Для изучения и решения сформулированной выше проблемы пористости штампованных заготовок из высокопрочных сплавов и решения проблемы переработки методами тиксоформинга сплавов, составы которых близки к эвтектическим, выбраны «трудные» по критериям табл. 1 сплавы с малым (менее 70 °С, сплав АЛ25) и очень большими (более 130 °С, сплавы В95 и В96Ц3) интервалами затвердевания. Как показано в табл. 4,

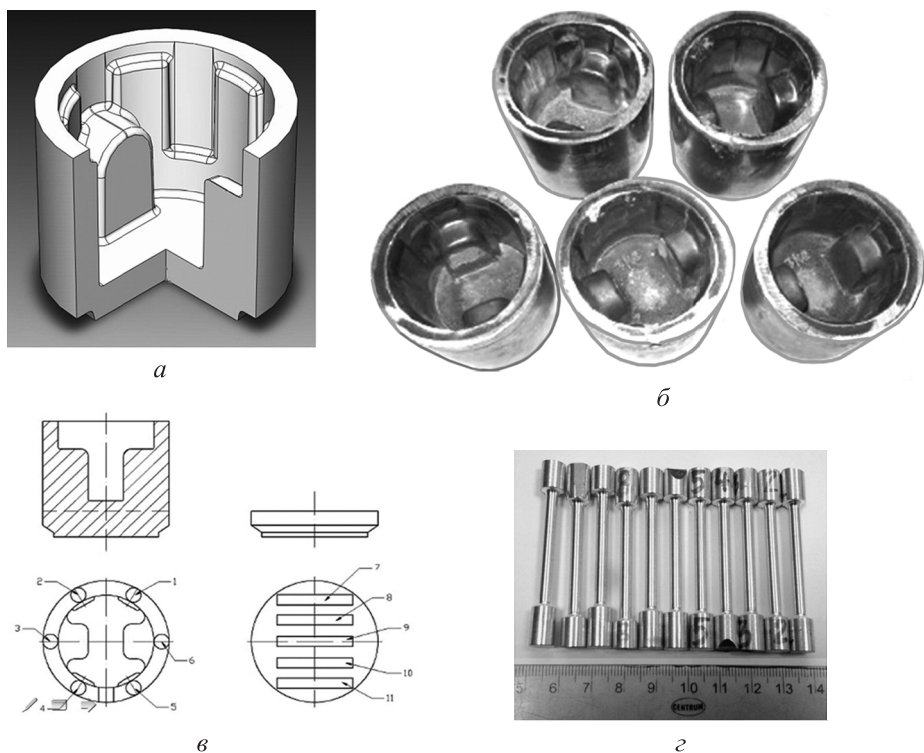


Рис. 9. Общий вид модельной штампованной заготовки и схема вырезки образцов:

a — чертеж детали в 3D; *б* — тиксоштампованные поковки из сплава В96ЦЗ; *в* — схема разрезки модельного образца поршня на образцы для механических испытаний; *г* — образцы для испытаний на растяжение

Таблица 4

Механические свойства сплава в зависимости от метода литья

Технология получения поршня, сплав АЛ25 Т6	Свойства			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
Литье в кокиль*	220	220	0,5	107
Жидкая штамповка ($P = 150$ МПа)*	250	240	0,85	120
Жидкая штамповка ($P = 150$ МПа) с последующей ГСО** ($T = 460$ °С; $P = 150$ МПа; $t = 3$ ч)	310	290	1,2	121
Тиксоштамповка	309	274	6,83	150

Примечание. *литературные данные; **ГСО — горячая статическая обработка.

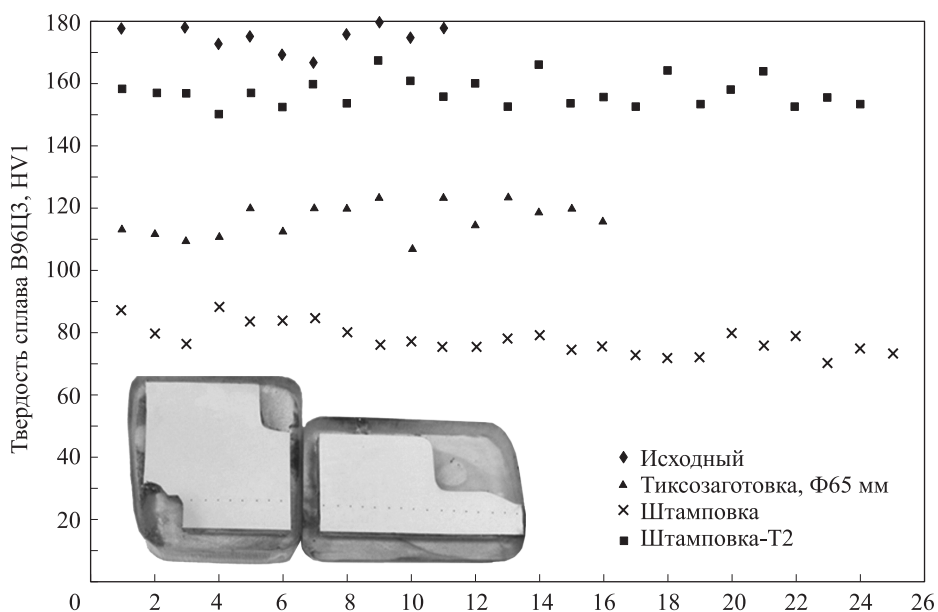


Рис. 10. Твердость HV1 сплава В96Ц3 на различных этапах формирования фасонной штамповки (для сравнения представлены результаты измерения твердости катаной плиты, использованной в качестве шихтового материала при литье тиксозаготовки)

из полученных по разработанной технологии литья тиксозаготовок (изготовлены методом водоохлаждаемого желоба [8–11]) из сплава АЛ25 можно за одну штамповую операцию изготавливать штамповки очень высокого качества с пластичностью и твердостью, значительно превосходящими характеристики сравниваемых аналогов [13–15].

Трудности достижения высокого качества в фасонных заготовках из сплавов В95, В96Ц3 связаны с очень широким интервалом их затвердевания (645...475 °С), высоким темпом кристаллизации твердой фазы в интервале температур, соответствующих 40...60 % твердой фазы, а также с отсутствием равновесной эвтектики. В результате на стадии получения тиксозаготовки описанным жидкофазным методом по границам гранул твердого раствора формируется очень развитая щелевая пористость, открытая для окружающей газовой среды. Как следствие, нагрев таких заготовок можно осуществлять только в защитной атмосфере, а усилие, необходимое и достаточное для устранения этой пористости, оказывается значительно большим, чем усилие, требуемое для формообразования фасонной штамповки. К настоящему моменту получены штамповки, имеющие высокое качество внешней поверхности и полноценное воспроизведение гравюры штампа, но сохраняющие заметную долю остаточной пористости. Одновременно следует отметить высокое качество гранул твердого раствора, фиксируемое измерением твердости

образцов (рис. 10), и высокую пластичность (14...18 %), установленную при растяжении образцов. Однако сохраняющаяся остаточная пористость пока не позволила достигнуть в изделии паспортизованных значений прочности названных сплавов в испытаниях на растяжение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yasuda H., Nagira T., Yoshiya M. et al. *Proc. John Hunt Symposium*, 2012, 335 p.
- [2] Flemings M.C. *Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State. Metallurgical Transactions A*, 1991, vol. 22A, pp. 957–981.
- [3] Семенов Б.И., Куштаров К.М. *Производство изделий из металла в твердоточном состоянии. Новые промышленные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 223 с.
- [4] Levaillant C. Rheological Aspects of Semi Solid Processing, *Proc. of the 1th Int. France*, 1990 (abstract).
- [5] Капранос П. Тиксоформинг: от автостроения до авиации и космоса. *Цветные металлы*, 2008, № 1, с. 95–100.
- [6] Yurko J.A., Martinez R.A., Flemings M.C. SSRTM: the Spheroidal Growth to Semi-Solid Forming. *Proc. of the 8th Int.*, 2004.
- [7] Thixoforming: Semi-solid Metal Processing by: Gerhard Hirt, Reiner Kopp, 2009, 450 p.
- [8] Семенов Б.И., Куштаров К.М., Сонг Ж.Х. Производство специализированных заготовок с тиксоструктурой с использованием синергетических принципов управления. *Мат. 4-го международного междисциплинарного симпозиума: Фракталы и прикладная синергетика*, Москва, 14–17 ноября 2005, с. 171–175.
- [9] Пат. РФ № 2356677, МПК В21J13/02. *Способ и устройство для тиксоштамповки цилиндрических заготовок*. Пасечник Н.В., Сивак Б.А., Белоусов И.Я., Семенов Б.И. и др. Оpubл. 27.05.2009. Бюл. № 15.
- [10] Пат. № 2444412 Российская Федерация, МПК В21С23/00, В21J5/06, В22D18/02. Семенов Б.И., Куштаров К.М., Джиндо Н.А. и др. *Способ тиксопрессования цилиндрической тиксозаготовки в режиме сверхпластичности ее твердой фазы*. Оpubл. 10.03.2012. Бюл. № 7.
- [11] Семенов Б.И., Куштаров К.М., Джиндо Н.А., Нго Тхань Бинь. Тиксоштамповка и тиксопрессование суспензированных сплавов. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2011, № 2, с. 21–23; № 3, с. 17–19; № 4, с. 10–13.
- [12] Акулов И.Е., Байдаков В.И., Васильев А.Г. *Техническая подготовка командира взвода ПЗРК 9К38 «Игла»*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 192 с.
- [13] Лобанов В.К., Чуйкова Е.В. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2009, № 46, с. 120–122.
- [14] Чуйкова Е.В. Влияние параметров горячего изостатического прессования на свойства сплава АЛ-25, закристаллизованного под давлением. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2006, № 33, с. 29–31.
- [15] Олейник А.К., Чуйкова Е.В., Нестеренко А.В. Влияние кристаллизации под давлением и термообработки на триботехнические показатели и микротвердость сплава АЛ-25. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2010, № 51, с. 73–77.

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Б.И. Семенов, Бинь Нго Тхань, А.Б. Семенов. Тиксоформирование фасонных деталей из алюминиевых сплавов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/639.html>

Семенов Борис Иванович родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Заслуженный работник высшего образования РФ, д-р техн. наук, проф. кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ и патентов в области разработки материалов, технологий и конструкций из композиционных материалов, член редколлегии журналов «Технология металлов» и «Заготовительные производства в машиностроении». e-mail: semenovbi@bmstu.ru

Бинь Нго Тхань родился 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор девяти научных публикаций в области разработки технологических процессов и конструкций из композиционных материалов. e-mail: thanhbinhakgl@yahoo.com

Семенов Алексей Борисович родился в 1972 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1996 г. Канд. техн. наук, доц. кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных публикаций. e-mail: semenov.ab@bk.ru