

УДК 621.73.08

## Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в тиксотехнологиях

**Ю.А. Бочаров, И.М. Койдан**

*Проанализировано взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в технологии штамповки металла в твердожидком состоянии (тиксостамповка). Приведены результаты экспериментальных исследований влияния этих параметров штамповки на характер формоизменения деформируемых образцов в твердожидком состоянии с глобулярной микроструктурой.*

**Ключевые слова:** тиксоштамповка, глобулярная микроструктура, твердожидкое состояние, скорость деформирования, температура заготовки, ламинарное течение, турбулентное течение, характер формоизменения.

## Mutual influence of workpiece heating temperature and deformation rate in semi-solid forging

**Yu.A. Bocharov, I.M. Koidan**

*The paper considers the mutual influence of the billet heating temperature and deformation rate in the technology of metal punching in a semi-solid condition (thixoforging). The results of the experimental studies of influence these punching parameters on forming type of deformable samples with a globular microstructure are presented.*

**Keywords:** thixoforging, globular microstructure, semi-solid material, deformation rate, slug temperature, laminar flow, turbulent flow, type of a forming.

Главной особенностью технологии твердожидкого деформирования является нехарактерное для классических технологий состояние материала заготовки перед деформированием. Деформируемый металл представляет собой твердожидкую суспензию, в которой глобулярные зерна первично кристаллизующейся  $\alpha$ -фазы равномерно распределены в эвтектической матрице с более низкой температурой плавления. Такая заготовка при определенных условиях обладает свойствами тиксотропности — резкое падение вязкости металлической суспензии со значительным снижением сопротивлению сдвиговым деформациям под воздействие деформирующей силы. Материал заготовки, приобретая свойства жидкости, легко и быстро затекает в формообразующие полости штампа при незначительной силе деформирования. Технологии тиксоформирования позволяют получать поковки высокого качества за один штамповочный переход при



**БОЧАРОВ**  
Юрий Александрович  
доктор технических наук



**КОЙДАН**  
Иван Михайлович  
аспирант  
кафедры «Технологии  
обработки металлов  
давлением»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: kim0886@mail.ru

незначительных, по сравнению с традиционной штамповкой, энергетических затратах на деформирование. Как правило, геометрия поковки максимально приближена к геометрии детали и имеет повышенные механические характеристики [1].

Одними из основных параметров тиксоштамповки является температура нагрева заготовки и скорость деформирования. Эти два параметра главным образом определяют характеристики течения металла, условие полного заполнения полости штампа, качество микроструктуры полученной поковки, наличие или отсутствие различного рода дефектов в теле поковки.

Нагретая до твердожидкого состояния тиксозаготовка во время формоизменения проявляет свойства жидкотекучести. При этом, в зависимости от соотношения температуры заготовки и скорости деформирования, поток твердожидкой суспензии может быть ламинарным или турбулентным. Это условие ограничивает возможности по варьированию параметров штамповки, поскольку возникновение турбулентных потоков во время течения металла крайне негативно сказывается на качестве поковки. Турбулентное течение металла в полости штампа приводит к захвату воздуха металлом и проникновению оксидной пленки с поверхностных слоев заготовки во внутренние области поковки [2]. Кроме того, нередко случаи возникновения эффекта разбрызгивания металла во время деформирования. Такой крайне нежелательный эффект возможен при одновременно высокой скорости деформирования и температуре нагрева заготовки, близкой к верхней границе температурного окна штамповки. Вместе с тем, обеспечение ламинарного потока металла сопряжено с опасностью преждевременной кристаллизации и незаполнению полости штампа.

Таким образом, при выборе температуры нагрева заготовки и скорости деформирования необходимо так подбирать соотношение этих двух параметров, чтобы обеспечить заполнение всей полости штампа при ламинарном течении металлической суспензии до полной кристаллизации металла. При этом следует учитывать,

что варьирование температурой нагрева заготовки может изменить диапазон допускаемых скоростей, в равной степени, как и подбор скоростей может изменить диапазон допускаемых температур.

**Экспериментальные исследования.** Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования проявлялось в ходе проведения экспериментальных исследований влияния этих параметров на характер формоизменения деформируемого образца. Для определения такого рода влияния на специализированной экспериментальной установке Gleeble-3800 фирмы Dynamic Systems, Inc., США ([www.bleeble.com](http://www.bleeble.com)) проводилась осадка алюминиевых цилиндрических образцов с глобулярной структурой в твердожидком состоянии. Технические характеристики используемого оборудования позволяли моделировать термомеханические условия реального технологического процесса тиксоштамповки. Эксперименты проводились в Институте обработки давлением Штутгартского университета (IFU, Uni Stuttgart) в г. Штутгарт (Германия) в рамках программы международного сотрудничества при поддержке Министерства образования и науки РФ и Германской службы академических обменов (DAAD).

Установка состоит из трех основных составляющих: испытательная машина с рабочей камерой, настольный персональный компьютер, промышленный компьютер (рис. 1).

Рабочая камера (рис. 2), соединенная с вакуумной системой, при необходимости обеспечивает разряжение не менее  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.



Рис. 1. Общий вид установки Gleeble-3800

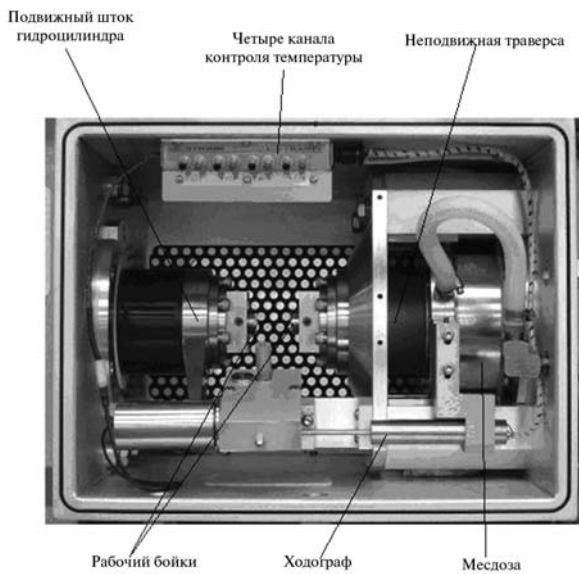


Рис. 2. Общий вид рабочей камеры для испытаний на сжатие

Экспериментальная установка Gleeble 3800 имеет следующие основные технические характеристики:

- максимальная сила сжатия — 200 кН;
- максимальная сила растяжения — 100 кН;
- программируемая скорость перемещения подвижного штока гидроцилиндра — до 2 000 мм/с;
- максимальная температура нагрева — 1 750 °С;
- скорость нагрева — до 10 000 °С/с;
- скорость охлаждения — до 10 000 °С/с;
- обработка на воздухе, в вакууме и в защитных атмосферах;
- максимальный момент кручения — 1 500 Н·м;
- скорость кручения — до 1 500 об/мин.

В экспериментах использовался алюминиевый литейный сплав А357 (AlSi7Mg0,6). Химический состав сплава представлен в табл. 1.

Выбор размеров заготовки определялся техническими возможностями оборудования и выбранной схемой деформирования (рис. 3). Диаметр заготовки выбран как максимально

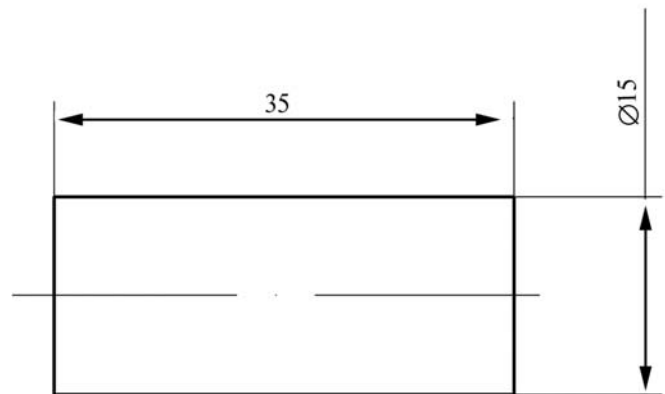


Рис. 3. Геометрические размеры используемой заготовки

допустимый к использованию в оборудовании для данного вида сплава и температуры нагрева. Увеличение диаметра заготовки могло привести к перегреву и разрыву токопроводящих проводников системы нагрева оборудованием. Длина принималась исходя из допустимого соотношения высоты осаживаемой заготовки к ее диаметру, имеющего величину не более 2,5.

**Параметры нагрева заготовки.** Вместо применяемого в тиксотехнологиях индукционного метода нагрева, в экспериментах нагрев образцов производился с помощью электрического тока методом сопротивления. Заготовка зажималась между двумя деформирующими бойками, через которые пропусклся электрический ток.

Температура нагрева заготовок выбиралась исходя из ширины температурного окна деформирования металла в твердожидком состоянии. Для сплава А357 ее значение составляет  $(580 \pm 6)$  °С [3]. По результатам экспериментальных исследований, проводимых в IFU, значение рекомендуемого температурным интервала тиксоштамповки для А357

Таблица 1

Химический состав сплава А357

Сплав	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Zn, %	Ti, %
AlSi7Mg0,6	6,5–7,5	0,15	0,03	0,01	0,5–0,7	0,07	0,1–0,18

Таблица 2

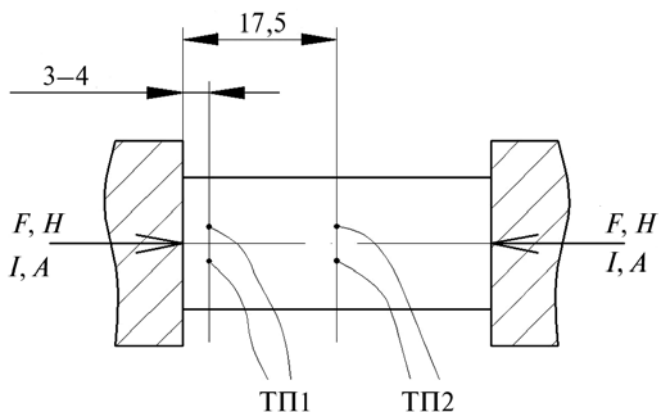


Рис. 4. Схема деформирования цилиндрической заготовки с зачеканенными термопарами:

$F$  — сила деформирования;  $I$  — электрический ток; ТП1, ТП2 — термопары

составляет  $(577 \pm 2)^\circ\text{C}$ . В ходе выполнения экспериментов заготовки нагревались до нижнего, среднего и верхнего уровней температурного окна тиксоштамповки, т. е., соответственно, до 575, 577 и  $580^\circ\text{C}$ .

Для контроля нагрева в заготовку зачеканивались две термопары (рис. 4).

Регулирование нагрева заготовки осуществлялось по показаниям датчика температуры на основе термопары ТП1, так как в торцевых областях при выбранном способе нагрева заготовка нагревается сильнее. При регулировании по показаниям датчика ТП2 торцы заготовки перегревались и подплавлялись, что приводило к выпадению ее из бойков.

Скорость нагрева заготовок выбиралась из опыта проведения подобных работ в IFU —  $3^\circ\text{C}/\text{с}$ . При такой скорости нагрева заготовка получала достаточную степень гомогенизации структуры и равномерность прогрева по объему.

Непосредственно после достижения заданной температуры заготовки прекращалась подача электрического тока и проводилось деформирование.

**Параметры деформирования.** В ходе работы было проведено три серии экспериментов по параметрам, представленным в табл. 2.

План проведения экспериментов

Номер серии эксперимента	Температура нагрева, $^\circ\text{C}$	Скорость нагрева, $^\circ\text{C}/\text{с}$	Скорость деформации, $\text{с}^{-1}$ (деформирования, мм/с)	Ход, мм	Условия окончания деформирования
1	575	3	1	20	По ходу
			2		
			4		
			6		
			10		
			14		
2	577	3	2	20	По ходу
			4		
			8		
			10		
			16		
3	580	3	2	20	По ходу
			4		
			8		
			10		
			16		

**Смазывающее вещество.** Во избежание сваривания рабочих поверхностей бойков с металлом заготовки и снижения трения между поверхностью бойков и заготовкой применялась графитовая смазка.

**Результаты экспериментов.** Среднее время нагрева заготовки до необходимых температур в диапазоне  $575...580^\circ\text{C}$  при скорости нагрева  $3^\circ\text{C}/\text{с}$  составило 201 с. Экспериментальный график нагрева одной из заготовок во времени представлен на рис. 5. Максимальный градиент температур по ходу нагрева между краевыми и центральной областями заготовки составил приблизительно  $3...4^\circ\text{C}$ .

Форма деформированных заготовок при различных скоростях деформирования в трех сериях экспериментов (см. табл. 2) показана на рис. 6. На рисунке 6 видно характерное изме-

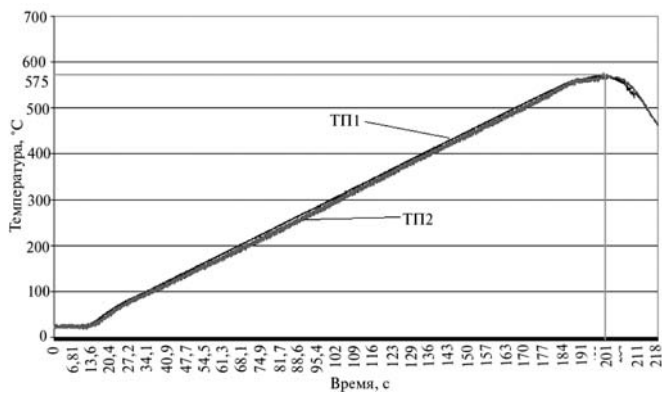


Рис. 5. Показания термопары ТП1 и ТП2 во время нагрева заготовки

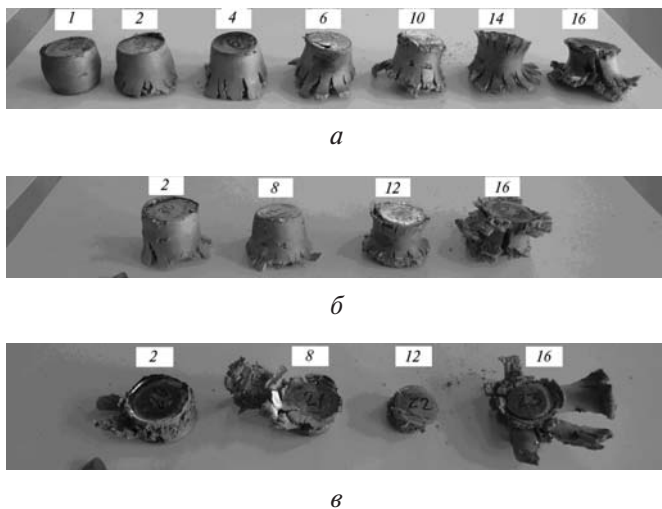


Рис. 6. Форма деформированных заготовок по результатам экспериментов:

а — серии № 1; б — серии № 2; в — серии № 3

нение формы деформированных заготовок в зависимости от скорости деформирования при различных температурах штамповки.

После прекращения подачи тока заготовка охлаждается. Как видно на рис. 6, а, при скорости деформирования 1 и 2 мм/с деформированные заготовки имели бочкообразную форму, как при обычной осадке. Это говорит о том, что температура заготовок снизилась ниже температурного окна тиксоштамповки прежде, чем завершился процесс деформирования, что приводило к переходу структуры заготовки из двухфазного в однофазное состояние и потере заготовкой свойств жидкотекучести. По мере увеличения скорости деформирования форма деформированных заготовок постепенно теряла бочкообразность. Отсутствие бочко-

образной формы и появление трещин в заготовке указывает на наличие двухфазной структуры заготовки на всем протяжении формоизменения. Причем чем ярче проявлялись эти эффекты, тем большее содержание жидкой фазы сохранялось в заготовке во время деформирования. Сокращение времени деформирования не позволяло температуре заготовки выйти за пределы температурного окна штамповки прежде, чем завершится формоизменение. Иными словами увеличение скорости деформирования позволяет увеличить время пребывания металла в твердожидком состоянии относительно всего процесса деформации.

Однако увеличение скорости деформирования при неизменной температуре заготовки может привести к такому нежелательному эффекту, как разбрызгивание твердожидкой фазы металла. При больших скоростях деформирования жидкая фаза резко вытесняется к периферии заготовки и отделяется от основного объема заготовки. Незначительное проявление такого эффекта наблюдалось при температуре 575 °C и скорости деформирования 16 мм/с, сопровождавшийся отделением небольшого количества металла от объема заготовки (см. рис. 6, а).

Форма деформированных заготовок в серии экспериментов № 2 (рис. 6, б) показывает частичную потерю тиксотропного состояния лишь при скорости деформирования 2 мм/с, где заметна незначительная бочкообразность формы. Дальнейшее увеличение скорости деформирования позволяло сохранить твердожидкое состояние на всем протяжении деформирования. Однако уже при скорости 16 мм/с наблюдается явный эффект разбрызгивания металла.

Повышение температуры нагрева до 580 °C увеличивает содержание жидкой фазы в структуре заготовки и, как следствие, эффект разбрызгивания с отделением значительной части металла заготовки возникал при всех скоростях деформации в серии экспериментов № 3, за исключением скорости 2 мм/с, где такого процесса практически не наблюдалось (рис. 6, в).

При анализе результатов экспериментов проявляется одна из трудностей, возникающая при тиксоштамповке — формирование турбу-

лентных потоков и возникновение разбрызгивания. Оба этих эффекта зависят от соотношения двух параметров штамповки — температуры нагрева заготовки и скорости деформирования. Как показали эксперименты, увеличение температуры нагрева заготовки требует снижения скорости деформирования, смещая, таким образом, диапазон допустимых скоростей  $\Delta V$  в сторону снижения. Уменьшение температуры заготовки, наоборот, требует увеличения скорости деформирования для предотвращения преждевременной кристаллизации металла. Такая же картина наблюдается с допустимой температурой нагрева, т. е. увеличение скорости деформирования смещает диапазон допустимых температур  $\Delta T$  в сторону снижения и позволяет проводить формоизменение с температурой заготовки, близкой к нижней границе температурного окна штамповки. Снижение скорости деформирования требует увеличения температуры нагрева заготовки, смещая, таким образом, диапазон допустимых температур в сторону увеличения.

Как показали эксперименты, степень взаимного влияния температуры нагрева заготовки и скорости деформирования велика. Диапазон допустимых скоростей деформирования может значительно меняться при небольшом

изменении температуры заготовки. Поэтому для обеспечения ламинарного течения металла во время заполнения полости штампа при определении технологических параметров тиксоштамповки очень важно учитывать это взаимовлияние двух параметров. Наличие взаимного влияния между температурой заготовки и скоростью деформирования позволяет применять адаптивные системы программного управления, способные производить оперативную корректировку одного параметра с целью компенсации отклонений в другом, обеспечивая таким образом получение высокого качества поковок.

## Литература

1. Бочаров Ю.А., Семенов Б.И., Хижнякова Л.В. Тиксоштамповка алюминиевых деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2006. № 10. С. 14—21; 2006. № 10. С. 15—21.
2. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
3. Siegert K., Messmer G., Baur J., Wolf A. Thixoschmieden von Aluminumbauteilen; Tagungsband zur 7. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik; 24—25. Oktober 2000; Chemnitz.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012