

УДК 621.98.043

*Д.А. Пономаренко¹, А.В. Скугорев¹, С.А. Сидоров¹, А.С. Шпагин¹***ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ЗАГОТОВКОЙ И ШТАМПОМ НА ПРОЦЕСС ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕССАХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-3-3

Исследован процесс штамповки деталей авиационно-космического назначения на специализированных изотермических прессах с усилием 630 и 1600 тс, имеющих дополнительное техническое оснащение. Показаны технологические возможности их эффективного использования при изготовлении деформированных деталей из жаропрочных титановых, никелевых и других сплавов в воздушной атмосфере с использованием штампов из литейного сплава ЖС6У. Исследовано влияние процесса деформации с малыми скоростями в условиях различного градиента температуры между заготовкой и штампом на силовые параметры штамповки, формообразование штамповок и их структуру. Показана возможность использования теплообмена между заготовкой и штампом для повышения эффективности процесса штамповки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: *изотермическая пресса, горячая деформация, скорость деформирования, теплообмен, жаропрочные титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы, температурные условия, градиент температуры, силовые параметры, формообразование, формирование структуры.*

The forming process of aerospace parts by special isothermal hydraulic presses of 6,3 and 16 MN with additional technical equipment is considered. Technological capabilities of their effective use for manufacturing parts of various typical sizes from Titanium-based, Nickel – based and other alloys in air environment using ZhS6U cast alloy dies are shown. Influence of low-speed forming in various temperature gradients between workpiece and die on power parameters of forging, forming process of workpieces and their structure changes are studied. The article presents the possibility of using the heat exchange between workpiece and die to improve deformation process.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.2. «Isothermal deformation on air of heterophased difficult-to-form superalloys of new generation» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Key words: *isothermal presses, heat deformation, deformation rate, heat exchange, titanium-based alloys, nickel-based superalloys, temperature conditions, temperature gradient, force stats, forming process, structure changes.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В отличие от обычной горячей штамповки деталей из титановых и никелевых сплавов в подогретых штампах на гидравлических прессах, КГШП и молотах, которую проводят при скоростях деформирования от 10 мм/с и выше, штамповку на специализированных изотермических прессах, оборудованных индукционными установками нагрева штамповых блоков, проводят со скоростью на 1–2 порядка ниже [2–5]. Как правило, скорость рабочего хода таких прессов составляет 0,2–2 мм/с [6]. При этом по сравнению с обычными методами горячей штамповки заготовка длительное время контактирует со штамповым инструментом, изготавливаемым из литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС6У [7]. В таких условиях на процесс формообразования заготовки, силовые параметры штамповки и работоспособность штамповой оснастки существенное влияние начинает оказывать происходящий между заготовкой и штампом теплообмен при наличии между ними определенного градиента температуры [8]. Во многих случаях такое влияние на формообразование и, как следствие, формирование структуры в деформируемой заготовке можно рассматривать как дополнительную технологическую возможность специализированных изотермических прессов [2], которые могут быть полезно использованы путем контролируемого отклонения температурных условий штамповки от изотермических с целью повышения эффективности процесса получения штамповок из жаропрочных титановых, никелевых, а также других сплавов.

Материалы и методы

Влияние градиента температуры между заготовкой и штампом на силовые параметры деформации исследовали при осадке цилиндрических заготовок из сплава ВТ9 размером $\varnothing 22 \times 130$ мм на плоских бойках до высоты 8 мм, соизмеримых с толщиной поперечного сечения лопаток ГТД. Получены сравнительные данные по силовым параметрам деформации в условиях, когда температура заготовки (T_3) превышает температуру штампа ($T_{ш}$), так и в условиях, когда температура штампа превышает температуру нагрева заготовки под деформацию.

При испытаниях в условиях $T_{ш} \leq T_3$ заготовки нагревали до температуры деформации 950°C, а температура нагрева штампов в индукционной установке пресса с усилием 630 тс варьировалась от 600 до 900°C (рис. 1, а), при этом также варьировалась скорость деформирования. Деформация в таких условиях позволила оценить воздействие на силовые параметры процесса двух факторов: влияние теплообмена при контакте заготовки с менее нагретым штампом и скорости деформирования. При отсутствии градиента температуры между заготовкой и штампом ($\Delta T = 0$), т. е. в изотермических условиях, определяющим оказывается влияние на усилие скорости деформирования. При $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ графики зависимости $q - \Delta T$ имеют точку пересечения, в которой влияние скорости деформирования уравнивается влиянием подстывания и упрочнения заготовки от контакта с менее нагретым штампом. При дальнейшем увеличении ΔT на величину усилия деформирования преимущественное влияние уже оказывает продолжительность контакта заготовки со штампом, которая определяет степень охлаждения поверхности и упрочнения заготовки от менее нагретого штампа. В таких условиях (при скорости деформирования 0,2 мм/с) усилие деформирования оказывается выше, чем усилие, развиваемое при большей скорости 2 мм/с.

При испытаниях в условиях $T_{ш} \geq T_3$ (рис. 1, б) температура штампа поддерживалась неизменной 950°C, а температура нагрева заготовки варьировалась от 800 до 950°C. Характер полученных графиков зависимостей показывает, что при отклонении

условий от изотермических (в сторону увеличения ΔT между заготовкой и штампом) пониженная скорость деформирования (0,2 мм/с) обеспечивает дополнительное снижение усилия деформирования за счет нагрева заготовки при контакте с более нагретым штампом, тем самым уменьшая сопротивление материала деформации.

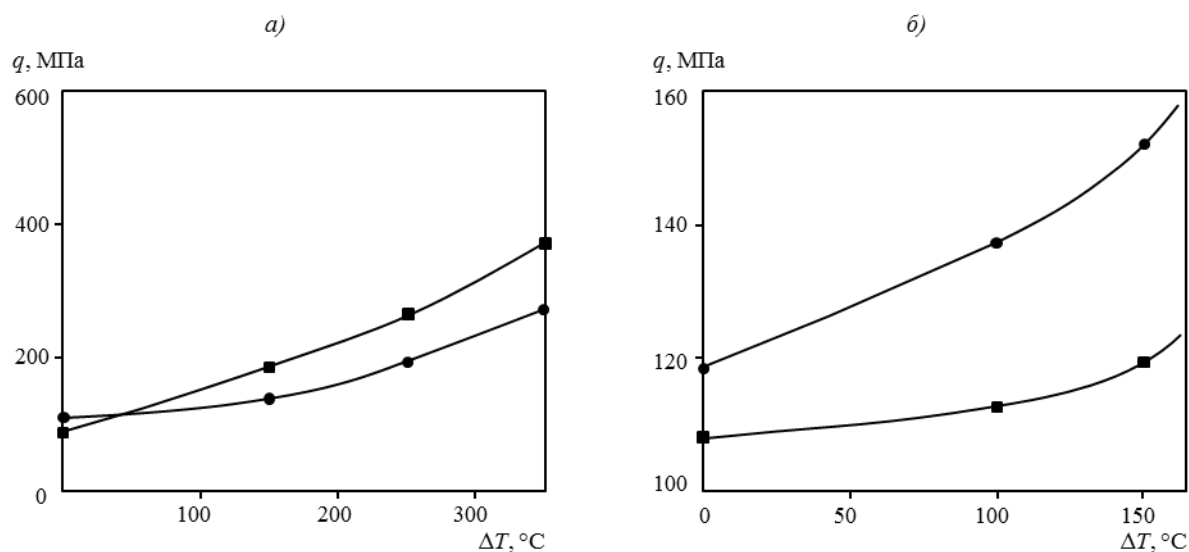


Рис. 1. Влияние градиента температуры между заготовкой и штампом на силовые параметры деформации заготовок из титанового сплава ВТ9 при $T_{ш} \leq T_з$ (а) и $T_{ш} \geq T_з$ (б): ● – $V_d = 2$ мм/с; ■ – $V_d = 0,2$ мм/с ($\Delta T = T_з - T_{ш}$; $T_з = 950^\circ\text{C}$)

Штамповка на специализированных изотермических прессах при малых скоростях деформирования в условиях температурного градиента (ΔT) между заготовкой и штампом оказывает влияние не только на силовые параметра процесса, но и на характер течения металла и формирование типа структуры по объему деформированной заготовки [9].

Благодаря контролируемой величине ΔT между заготовкой и штампом, можно не только управлять формой заготовки при свободной осадке, но и влиять на заполнение металлом узких полостей гравюры штампа. В частном случае, при осадке цилиндрической заготовки малого диаметра из сплава ВТ9 по схеме «на плите с отверстием» показано влияние температурного градиента между заготовкой и штампом на глубину заполнения металлом отверстия (Z) (рис. 2).

При $T_{ш} \leq T_з$ заготовку нагревали до 950°C , а температуру инструмента изменяли от 450 до 950°C (рис 2, а). В процессе осадки скорость деформирования составляла $0,2$ мм/с, степень деформации 70% . При значительной величине ΔT подстывание приконтактных с инструментом слоев заготовки ограничивает течение металла в полость штампа, так как деформация локализуется преимущественно в средних слоях заготовки. По мере приближения условий деформации к изотермическим глубина заполнения резко увеличивается и достигает значения $Z = 5$ мм.

Наиболее интенсивное заполнение полости происходит при условиях, когда $T_{ш} \geq T_з$ (рис. 2, б). Повышенное затекание металла в полость штампа в этом случае обеспечивается дополнительным прогревом приконтактной с инструментом зоны заготовки, ее разупрочнением относительно центральной зоны.

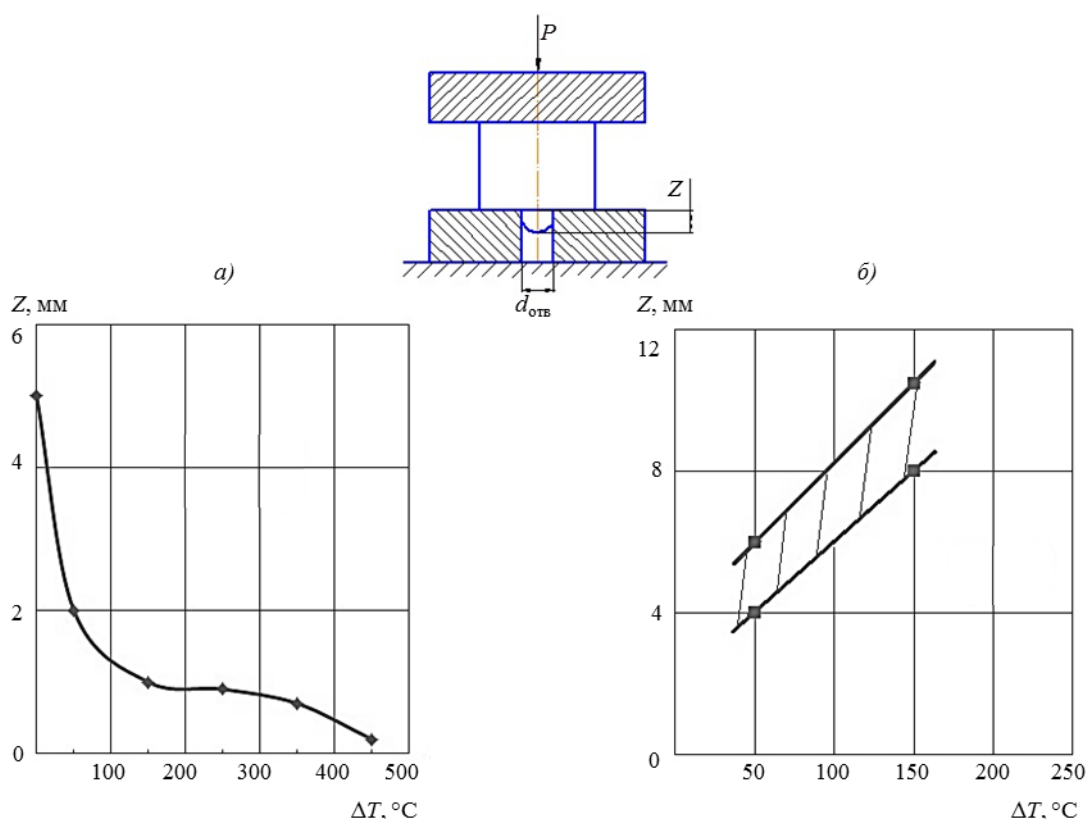


Рис. 2. Влияние градиента температуры между заготовкой и штампом на оформление тонкого элемента штамповки из титанового сплава ВТ9 ($\Delta T = T_3 - T_{ш}$; $T_3 = 950^\circ\text{C}$) при $T_{ш} < T_3$ (а) и $T_{ш} \geq T_3$ (б)

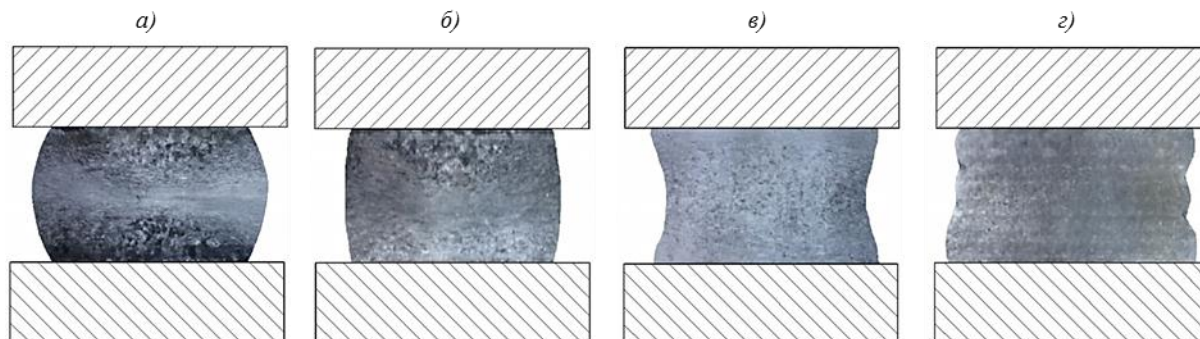


Рис. 3. Влияние градиента температуры между заготовкой и штампом на структурное состояние штамповок из сплава ВТ9: а – при $T_{ш} < T_3$; б – при $T_{ш} = T_3$; в – при $T_{ш} > T_3$; г – при $T_{ш} > T_3$ и $T_{ш} < T_3$

Влияние ΔT между заготовкой и штампом на структурное состояние штамповок показано при осадке цилиндрических заготовок из сплава ВТ9 на шайбы на изотермическом прессе с усилием 6,3 МН (рис. 3). В исходном состоянии материал заготовки имел однородную макроструктуру 5-го балла. После осадки при $T_{ш} < T_3$ в структуре выражены зоны преимущественного течения металла и затрудненной деформации. В приконтактных зонах сохранена непроработанная исходная структура. Форма отштампованной заготовки имеет характерную бочкообразность, как следствие высокую неравномерность деформации. В условиях, когда $T_{ш} = T_3$, влияние сил контактного трения и тепловой эффект также могут приводить к существенной неравномерности деформации и неоднородности структуры шайбы. Отштампованная в таких условия заготовка имеет

заметную бочкообразность и видимые зоны затрудненной деформации в приконтактных областях заготовки. В условиях, когда $T_{ш} > T_3$, обеспечивается преимущественное течение приконтактных слоев заготовки вследствие их прогрева от штампа и разупрочнения в процессе деформации. В результате этого зона затрудненной деформации смещается к центральной части заготовки (рис. 3, в), а в приконтактных зонах имеет удовлетворительную степень проработки структуры материала. С целью получения заготовок (шайб) с однородной проработанной структурой по всему объему заготовки при свободной осадке с ограниченной деформацией, в некоторых случаях (в зависимости от геометрии заготовки, исходной структуры, физических свойств сплава и других факторов) целесообразно применять двухстадийную осадку с изменением знака ΔT между заготовкой и штампом. Первую стадию осадки проводят в условиях, когда $T_{ш} > T_3$, для проработки структуры в приконтактных зонах, а вторую – при $T_{ш} < T_3$, для проработки структуры центральной части заготовки. На второй стадии (рис. 3, г) устраняется «обратная» бочкообразность заготовки, приобретенная на первой стадии, и ее форма вновь приближается к цилиндрической.

Результаты

Технологические приемы штамповки с контролируемым температурным градиентом между заготовкой и штампом используются в условиях ФГУП «ВИАМ» на специализированных изотермических прессах при серийном производстве штампованных заготовок как из титановых, так и жаропрочных сплавов [10].

Наряду с вышеуказанным приемом использования контролируемого теплообмена между заготовкой и штампом известен и применяется на практике технологический прием, в котором требуется неравномерное температурное поле в заготовке создается не только за счет теплообмена со штамповым инструментом, но и путем контакта со специально подготовленной холодной заготовкой. В этом случае исходную заготовку нагревают в печи до температуры деформации и сразу после выноса из печи вводят в контакт с подготовленной холодной заготовкой, после чего помещают в штамповый инструмент и деформируют. Таким способом (в частности, свободной осадкой цилиндрической заготовки на плоских бойках) в серийном процессе формируют несимметричную заготовку с контролируемой геометрией, оптимальной для дальнейшей штамповки из нее в закрытом штампе заготовки крыльчатки компрессора из титанового сплава BT8 [11, 12].

На рис. 4 представлены серийные деформированные заготовки из жаропрочных титановых сплавов, изготовленные на специализированных изотермических прессах с усилием 630 и 1600 тс с использованием технологического приема создания в исходной заготовке контролируемого неравномерного температурного поля за счет теплообмена со штамповым инструментом. Такой технологический прием позволил изготовить качественные полые тонкостенные заготовки деталей, а также заготовки с тонкими элементами (оребрение, антивибрационная полка лопатки) с оптимальной однородной структурой и высоким КИМ.

В отличие от штамповки заготовок из жаропрочных титановых сплавов, температура нагрева под деформацию которых обычно не превышает 980–1000°C, температура нагрева заготовок под деформацию жаропрочных никелевых сплавов достигает 1130°C и выше. Требуемые удельные усилия деформации этих сплавов, по сравнению с титановыми сплавами, в 1,5–2 раза выше [13]. Исходя из прочностных характеристик литейного сплава ЖС6У и для обеспечения удовлетворительной работоспособности штампов из этого сплава, при штамповке деталей из жаропрочных никелевых сплавов температуру нагрева целесообразно ограничивать (950–980°C) [14], т. е. проводить деформацию не в изотермических, а в приближенных к изотермическим условиях. В этом

случае штамповка при $T_{ш} < T_3$ с градиентом температуры 90–180°C является вынужденной мерой обеспечения стойкости штамповой оснастки из сплава ЖС6У. Отрицательный эффект от отклонения температурных условий штамповки от изотермических можно свести к минимуму с помощью выбора оптимальных скоростных условий деформации.

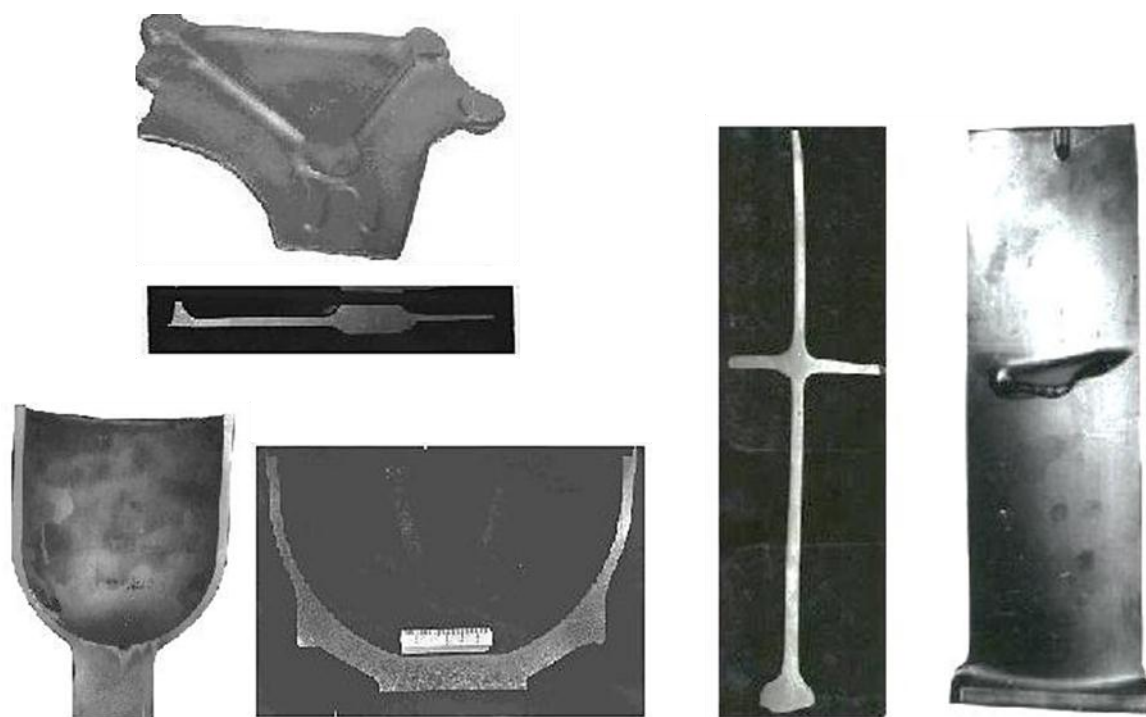


Рис. 4. Штамповки из титановых сплавов, полученные с использованием метода создания в них контролируемого неравномерного температурного поля

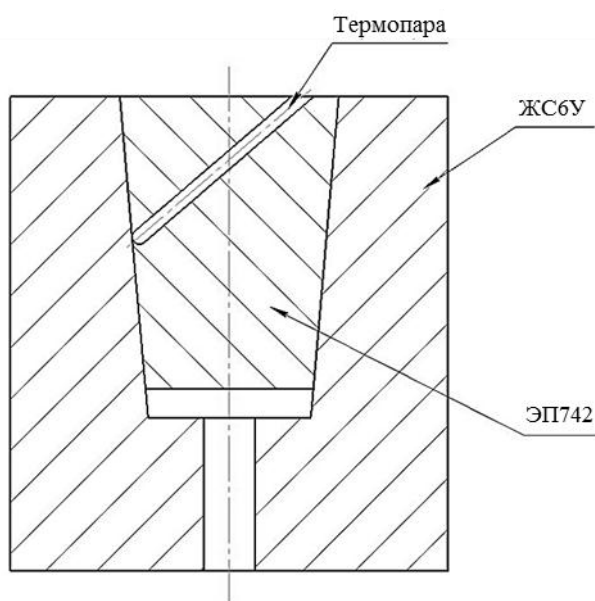


Рис. 5. Схема эксперимента по теплообмену

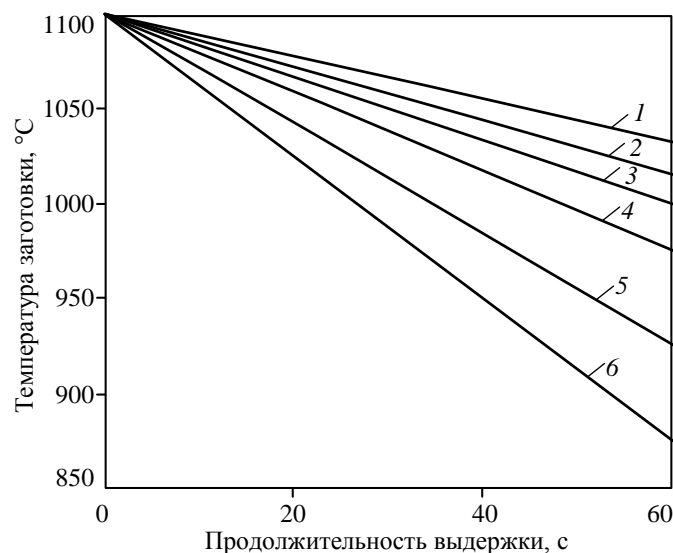


Рис. 6. Изменение температуры заготовки из сплава ЭП742-ИД в зависимости от температуры нагрева штампа: 1 – до 950°C; 2 – до 900°C; 3 – до 800°C; 4 – до 650°C; 5 – охлаждение на воздухе; 6 – до 400°C

Характер теплообмена между заготовкой и штампом в условиях, приближенных к реально используемым при деформации жаропрочных сплавов на никелевой основе, исследован на модельном инструменте «заготовка–штамп» путем термометрирования зоны контакта заготовки со штампом с помощью хромель-алюмелевой термопары (с регистрацией на самопишущий прибор). Схема проведения эксперимента представлена на рис. 5. Температура нагрева заготовки при этом составляла 1100°C, что соответствовало температуре нагрева под деформацию некоторых жаропрочных никелевых сплавов, а температуру нагрева модельного штампа варьировали в интервале 400–950°C. Для сравнения представлен вариант охлаждения заготовки на воздухе вне контакта со штампом. При охлаждении заготовки на воздухе в подвешенном состоянии за 60 с температура поверхности заготовки снижается с 1100 до 925°C (рис. 6). При контакте со штампом, нагретом до 400°C, охлаждение интенсивнее, чем на воздухе, и за 60 с контакта температура поверхности заготовки составила 875°C. В штампе, нагретом до температур 900–950°C, интенсивного снижения температуры заготовки не происходит. За 60 с в штампе, нагретом до 950°C, поверхностный слой заготовки в зоне контакта снижается с 1100 до 1035°C. Полученные данные позволяют сделать вывод, что при серийной штамповке реальных деталей из жаропрочных никелевых сплавов (ЭП742, ЭК79, ЭК151, ЭП975, ВЖ175) продолжительность контакта между заготовкой и штампом следует ограничивать. Это достигается путем проведения деформации с верхними значениями диапазона скоростей движения траверсы пресса [15]. Увеличение продолжительности контакта заготовки со штампом в данном случае нежелательно как для деформируемой заготовки, которая охлаждается и теряет пластичность, так и для штампа, поверхностный рабочий слой которого нагревается от контакта с заготовкой и разупрочняется. Опыт серийного производства малогабаритных штамповок дисков из жаропрочных никелевых сплавов [16], а также данные термометрирования в модельном штампе (рис. 5) показывают, что продолжительность деформирования (приложения нагрузки) за один штамповый переход не должна превышать 30–40 с. В этом случае при массовом производстве заготовок дисков достигается удовлетворительная стойкость штамповой оснастки и стабильное качество продукции.

Обсуждение и заключения

На процесс формообразования заготовки, в условиях низких скоростей рабочего хода специализированных изотермических прессов, существенное влияние оказывает теплообмен между заготовкой и штампом при наличии между ними определенного градиента температуры.

За счет контролируемого теплообмена между заготовкой и штампом можно изменять характер течения металла для управления формой заготовки при свободной осадке или интенсивностью затекания металла в полость штампа.

Технологические приемы с использованием контролируемого градиента температуры между заготовкой и штампом могут быть применены при серийном производстве штампованных заготовок из никелевых и титановых жаропрочных сплавов на специализированных изотермических прессах. Использование этих приемов позволяет получать изделия с повышенным КИМ и оптимальной структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Штамповка дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 13–16.
3. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2013. №10. С. 13–17.
4. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 25–30.
5. Разуваев Е.И., Лебедев Д.Ю., Бубнов М.В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №3. С. 3–8.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
7. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
8. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные тр. (К 100-летию со дня рождения). М.: Наука, 2006. 407 с.
9. Савушкин А.Н., Кашапов О.С., Голынец С.А. Влияние скорости нагружения на механические свойства жаропрочных титановых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №3. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-4-4.
10. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
11. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015).
12. Скугорев А.В., Бурханова А.А., Ночовная Н.А., Изотова А.Ю. Эффективность применения изотермической деформации при изготовлении штамповок из титановых сплавов // *Титан*. 2013. №1 (39). С. 31–34.

13. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. № 3–4. С. 34–38.
14. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
15. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015).
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.