

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ В СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Машеков Серик Акимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства» (СМиТМП) Казахского национального технического университета (КазНТУ) им. К.И. Сатпева, e-mail: mashkov.1957@mail.ru

Нургазаев Адилжан Елеуович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры СМиТМП КазНТУ им. К.И. Сатпева

Нурахметова К. К., аспирант кафедры

Сембаев Нурболат Сакенович, кандидат технических наук, доцент кафедры СМиТМП КазНТУ им. К.И. Сатпева

В статье путем компьютерного моделирования технологического процесса прокатки в гладких валках и осадки в выпуклых бойках, а также изотермической штамповки определены рациональные режимы деформирования заготовок, позволяющие получить компрессорные лопатки с мелкозернистой структурой.

Ключевые слова: прокатка, осадка, бойки, валки, штамповка, лопатка.

The article by computer simulation of the process of rolling in smooth rolls and rainfall convex Boyko, as well as isothermal forging a rational modes of deformation of billets, you always get the compressor blades with fine-grained structure.

Keywords: rolling, sediment, strikers, rolls, stamping, blades

Введение

Совмещенные процессы обработки металлов давлением (ОМД) широко применяются в кузнечно-штамповочном производстве (КШП) [1]. Для совмещенных процессов ОМД характерна значительная проработка структуры материала и получение изделий с высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Известно, что проектирование совмещенных процессов ОМД связано с решением таких технических и технологических задач, как выбор температурно-скоростных режимов деформирования и энергосиловых параметров обработки, оценка влияния распределения деформации на структуру и свойства получаемого изделия, а так же конструирования инструмента [2]. Несмотря на стремление инженеров к разработке технологии с равномерным распределением напряженно-деформированного состояния (НДС) по всему объему деформируемой заготовки, в реальных процессах КШП не достигается равномерное распределение НДС. Это приводит к неоднородной проработке структуры материала, его разнотекучности и анизотропии механических свойств.

В связи с вышесказанным современные исследования в области совмещенных процессов ОМД необходимо проводить в направлении разработки технологии, позволяющих управлять структурой и свойствами материала получаемых деталей на разных этапах обработки совмещенных процессов [3].

По мнению авторов работы [4] наиболее перспективным направлением исследований процессов ОМД является использование средств математического моделирования. По их мнению, это позволяет, во-первых, проводить детальный и многофакторный анализ влияния НДС и температурно-скоростных режимов деформирования на свойства изделия и, во-вторых, значительно снижает затраты и время на проведение исследований.

В настоящее время в качестве средств математического моделирования технологических процессов широко применяют САЕ-системы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) [5]. Данный метод позволяет с большой точностью исследовать НДС в любой точке пластически деформируемого образца с учетом реологических особенностей их материалов. Применение МКЭ позволяет, без значительных количеств допущений и ограничений, строить более совершенные математические модели, в том числе и объемные. Поэтому с помощью МКЭ полученные результаты являются более объективными. МКЭ – универсальный метод, имеющий простую физическую основу и математическую форму, которая реализуется с помощью гибкого алгоритма, хорошо приспособленного для решения на ЭВМ.

Применяя САЕ-системы процессы ОМД активно исследуются в последние 15 – 20 лет. За этот период появились мощные программные комплексы, такие как ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN, COSMOS, DeForm и QForm, позволяющие моделировать такие процессы ОМД, как прокатка, прессование, объемную штамповку, высадка и др [5]. В настоящее время исследователями накоплен большой опыт в разработке геометрических моделей инструментов и заготовок, определении компонентов тензоров напряжений и деформации, скоростей

деформации, полей температур в каждой точке деформируемой заготовки, расчете энергосиловых параметров оборудования. Полученный опыт использования средств математического моделирования позволил вывести проектирование технологических процессов ОМД на новый научный уровень, в частности, появилась актуальная задача — изменяя параметры НДС, температуры и скоростей, прогнозировать и управлять свойствами в получаемом изделии.

В данной работе ставится цель: проектировать технологический процесс совмещенного процесса изготовления компрессорных лопаток путем расчета и равномерного распределения степени деформации сдвига. Основа метода заключается в количественном определении размеров зерен в зависимости от величины и распределения степени деформации сдвига в заготовке при совмещенном процессе ОМД.

Необходимо отметить, что для реализации данного метода необходимо имеет функциональные зависимости, связывающие параметры процессов нагрева и НДС со структурой и свойствами материала. Для получения подобных зависимостей требуется проведение большого объема экспериментальных исследований. Кроме того, найденные зависимости будут справедливы только для каждой отдельной группы исследуемых материалов.

Несмотря на вышесказанное, в настоящее время уже появились CAE-системы (программа MSC.SuperForge), имеющие программные модули, позволяющие проводить подобный анализ [6], а также функциональные зависимости [7] и несмотря на то, что в качестве исходных параметров используются усредненные характеристики для используемого материала и не учитывается состояние его начальной структуры, данная программа и функциональные зависимости выдают достоверные результаты. Достоверность расчетов и эффективность применения MSC.SuperForge для компьютерного моделирования процессов прокатки,ковки и штамповки подтверждает опыт ведущих промышленных компаний Японии, США и ЕС.

Материалы и методика эксперимента

В работе предлагается новая технология изготовления поковок компрессорных лопаток: нагрев, прокатка в гладких валках в интервале температур 1000-950 °С, осадка в выпуклых бойках в интервале температур 800-750 °С и изотермическая штамповка при температуре 650°С.

Для расчета НДС использовали специализированную стандартную программу MSC.Super Forge [2]. Трехмерная геометрическая модель заготовки и инструментов была построена в CAD программе Inventor и импортирована в CAE программу MSC.SuperForge.

Для исследования совмещенного процесса изготовления компрессорных лопаток, как прокатка в гладких валках и осадка в выпуклом инструменте использовали прямоугольную заготовку размером 5×20×50 мм. Совмещенный процесс моделировали в трехмерной среде с разбиением заготовки на 4-х узловые элементы (СТЕТРА). Для модели заготовка потребовалось 2439 элементов и 3096 узла. Материал заготовки титановый сплав ВТ6 с температурным диапазоном деформирования 630...1200°С. Из базы данных программного комплекса «MSC.SuperForge» задавали реологические свойства. При этом материал заготовки принимали изотропным упругопластическим с нелинейным упрочнением (BISO). На поверхности инструмента с заготовкой коэффициент трения принимали равным 0,3. Инструменты рассматривали как абсолютное твердые тела.

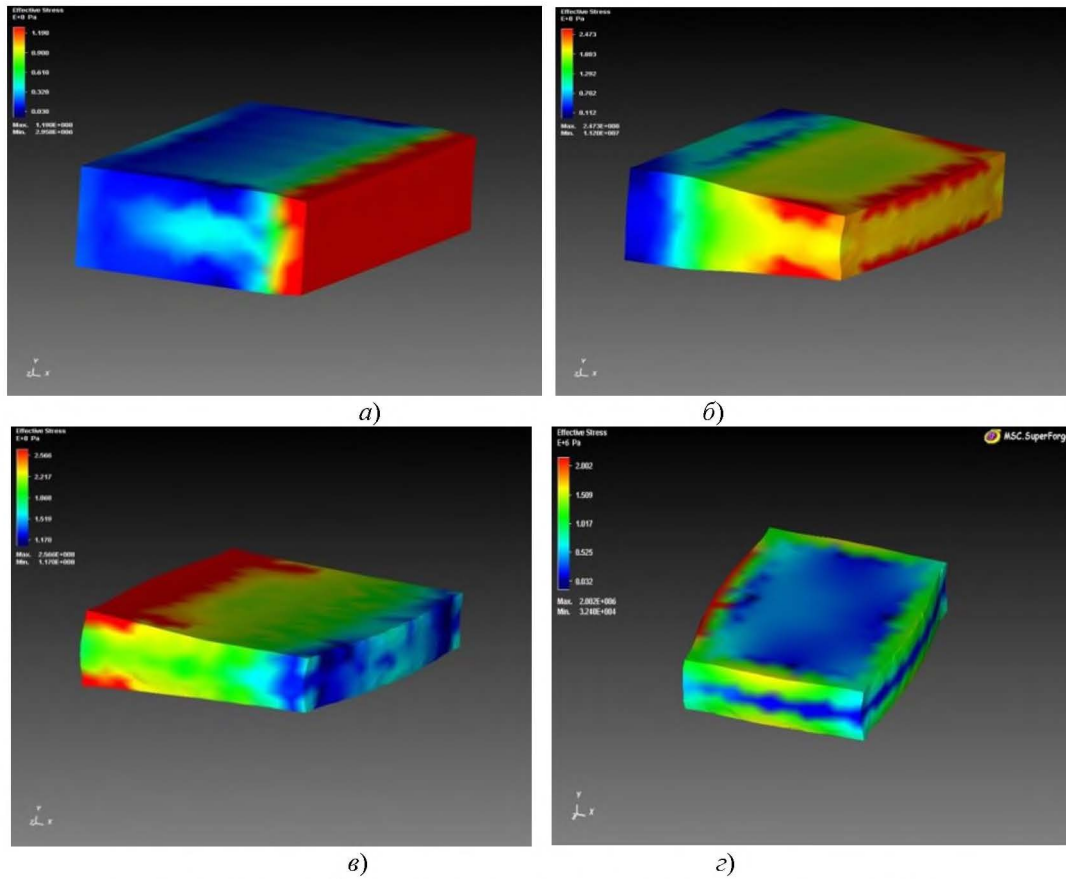
Запускали программу «MSC.SuperForge». Шаговым методом рассчитывали перемещения U , компоненты тензора деформации ϵ , компоненты тензора скорости деформации $\dot{\epsilon}$, компоненты тензора напряжения σ , интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, распределение температур по объему заготовки. При этом для наглядности отображения результатов расчета взяли данные для четырех стадии в процентном отношении к полному времени деформирования, т.е. были выбраны следующие интервалы: первая стадия 10, вторая стадия 40, третья стадия 70 и четвертая стадия 100 процентов от полного времени деформирования.

Результаты и обсуждение

На рисунках 2 и 3 представлены картина распределения интенсивности напряжений и деформаций при прокатке заготовки прямоугольного сечения на гладких валках.

Численным моделированием полученные результаты позволили установить, что:

1) При прокатке в гладких валках в начальный момент прокатки (первая стадия) интенсивность деформации (Γ) и напряжения (σ_i) сосредотачиваются в зонах захвата металла валками стана (рисунки 1,а и 2,а). С увеличением времени деформирования (вторая стадия) максимальные по величине Γ и σ_i сосредотачиваются на краях деформируемой заготовки (рисунки 1,б и 2,б). При этом в центре заготовки интенсивность напряжений повышается;

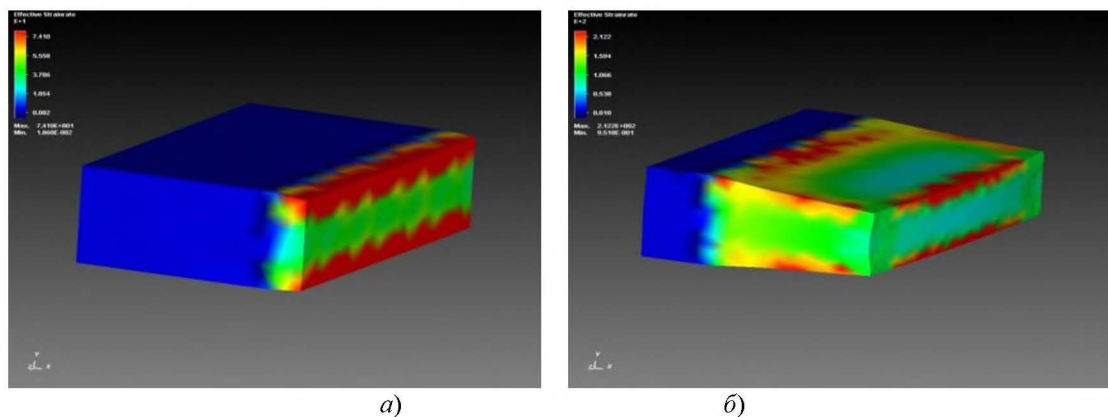


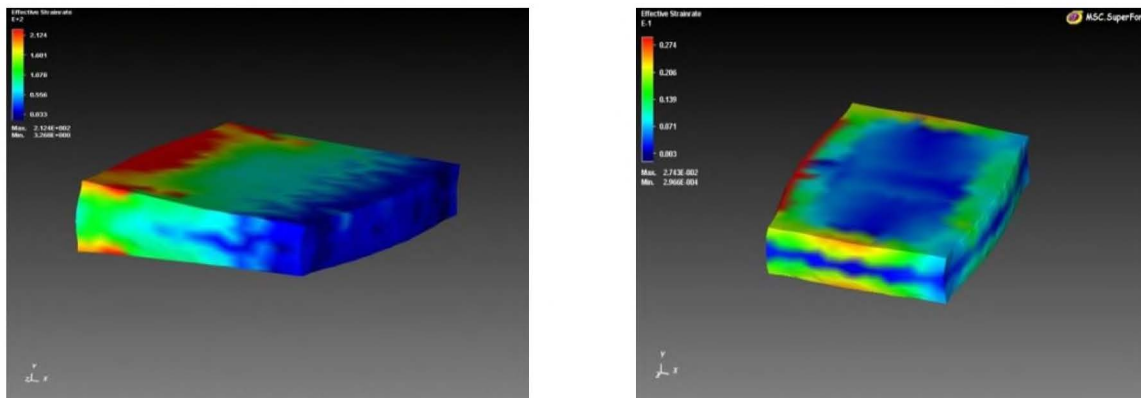
а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия; з - четвертая стадия

Рис. 1. Картина распределения интенсивности напряжений по сечению заготовки при прокатке в гладких валках с $\varepsilon = 20\%$

2) На следующих стадиях прокатки (третья и четвертая стадия прокатки) акцент интенсивности напряжений и деформации переносится от края и центра заготовки в зону контакта вала с прокатуемой заготовкой (рисунки 1,в,з и 2,в,з). Такое распределения интенсивности напряжения и деформаций по стадиям приводит к более равномерному распределению суммарного Γ и σ_i по очагу деформации;

3) В процессе прокатки в гладких валках температура в зонах контакта «горячий металл – валки» снижается.





а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия; г - четвертая стадия

Рис. 2. Картина распределения интенсивности деформации по сечению заготовки при прокатке в гладких валках с $\varepsilon = 20\%$

Путем суммирования интенсивности деформации произвели расчет степени деформации сдвига Λ (накопленной деформации) для прокатке в гладких валках.

Анализ эпюр изменения Λ по сечению заготовки при прокатке в гладких валках показывает, что при деформировании с единичным обжатием $\varepsilon = 20\%$ степень деформации сдвига имеет наибольшее значение в поверхностной зоне прокатуемой заготовкой (рис. 3, где H_i и B_i – расстояние до исследуемой точки по высоте и ширине заготовки; H_0 и B_0 – высота и ширина заготовки, соответственно).

На рисунках 4 и 5 представлены картины распределения интенсивности напряжений и деформаций в заготовке при выполнении операции осадки в выпуклых бойках.

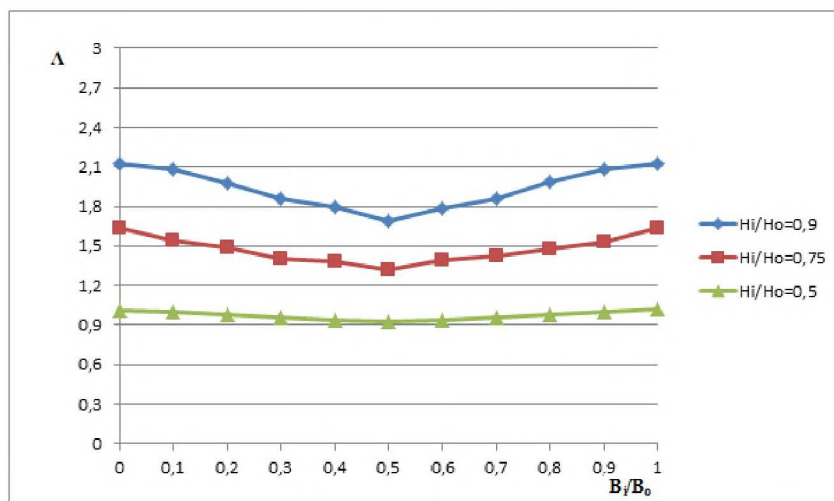
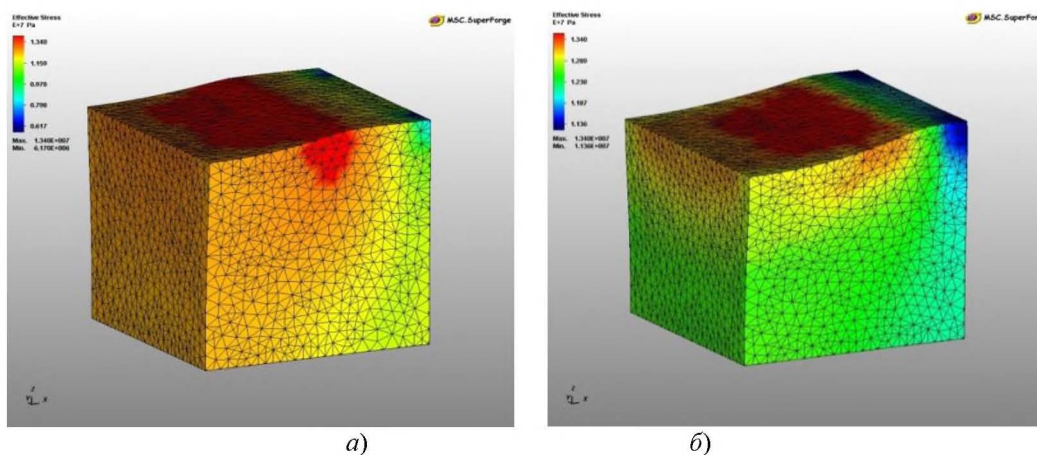
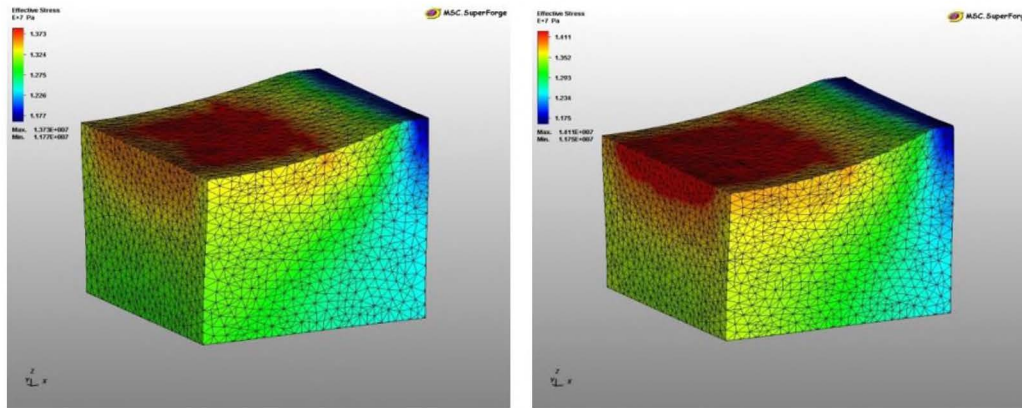


Рис. 3. Распределение Λ по поперечному сечению заготовки при прокатке в гладких валках с $\varepsilon = 20\%$



а)

б)

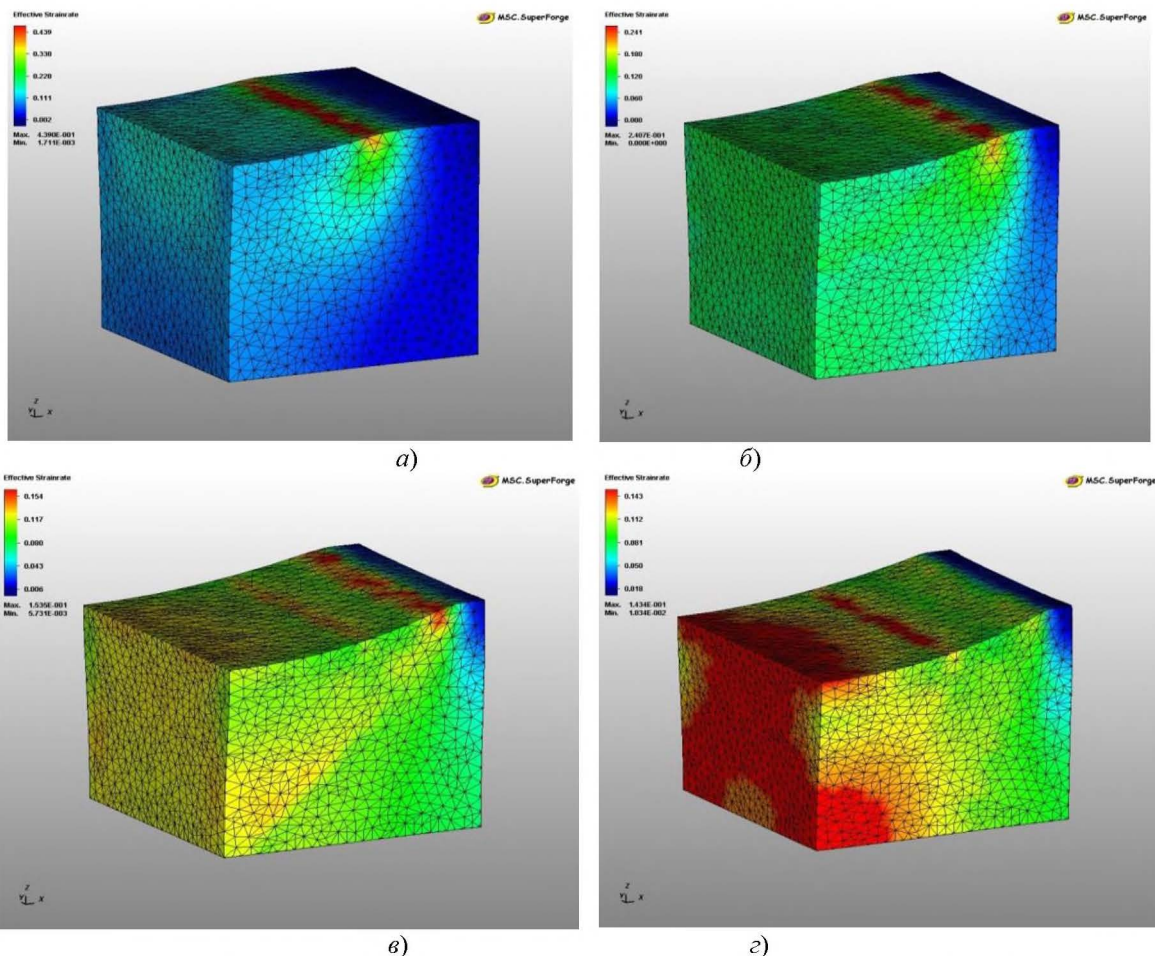


а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия; г - четвертая стадия

Рис. 4. Картина распределения интенсивности напряжений в заготовке при осадке в выпуклом инструменте

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- 1) В начальный момент осадки в выпуклых бойках интенсивности напряжения и деформации локализуются в контактных зонах заготовки с инструментом (рисунки 4,а, и 5а.);
- 2) Увеличение единичного обжатия приводит к переносу акцента интенсивности напряжений и деформаций от контактной поверхности к центру и периферии заготовки (рисунки 4,б, в, г и 5,б, в, г);
- 3) В процессе осадки в выпуклых бойках в зонах локализации деформации повышается температура;
- 4) С увеличением единичного обжатия максимальная величина контактного давления переносится от оси к периферии заготовки;
- 5) Характер скорости течения металла аналогичен развитию интенсивности деформации во времени.



а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия; г - четвертая стадия

Рис. 5. Картина распределения интенсивности деформации в заготовке при осадке в выпуклом инструменте

Анализ эпюр изменения Λ по сечению заготовки при осадке в выпуклых бойках показывает, что степень деформации сдвига имеет большое значение в центральных зонах, прилегающих к вертикальной оси заготовки и на участках, прилегающих к зоне контакта «горячий металл – инструмент» (рис. 6 и 7).

Для исследования эволюции микроструктуры использовали модель глобуляризации титанового сплава ВТ6 по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову, полученная в работе [7]. По данной модели произвели расчет объемную долю и средний размер глобулярных зерен титанового сплава ВТ6.

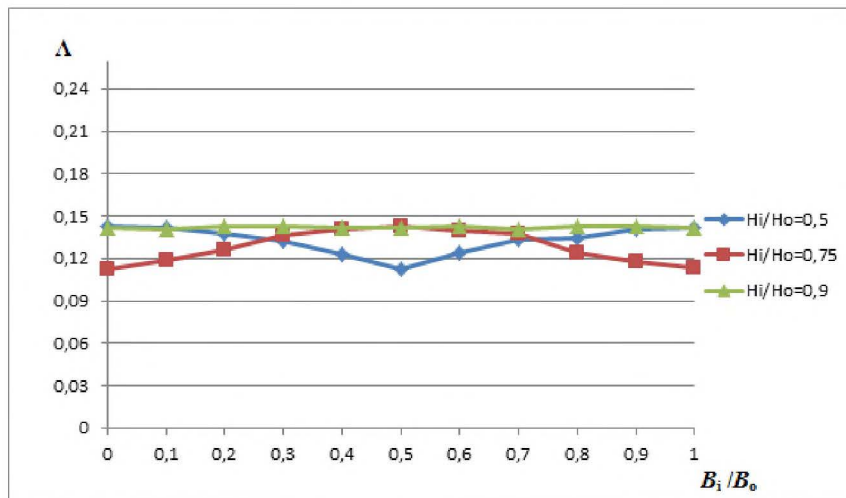


Рис. 6. Распределение Λ по поперечному сечению заготовки при осадке в выпуклых бойках ($L_1/L_0 = 0,5$, где L_1 – расстояние до исследуемой точки по длине заготовки; L_0 – длина заготовки, соответственно)

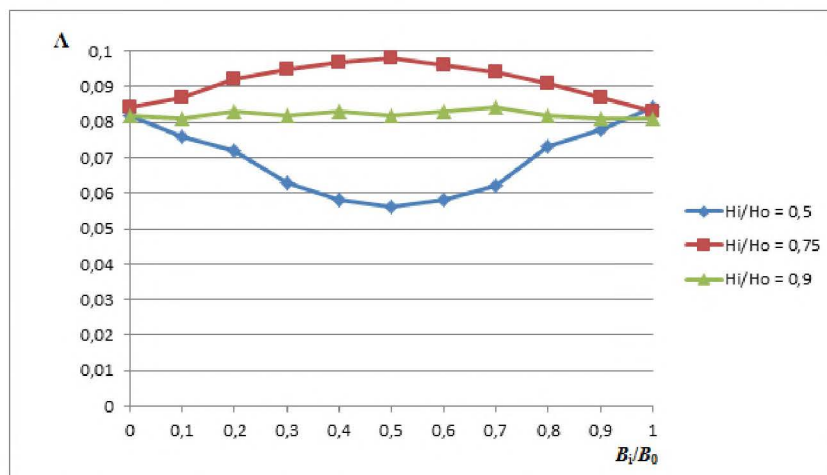


Рис. 7. Распределение Λ по поперечному сечению заготовки при осадке в выпуклых бойках ($L_1/L_0 = 0,8$, где L_1 – расстояние до исследуемой точки по длине заготовки; L_0 – длина заготовки, соответственно)

Критическую деформацию, необходимую для формирования глобулярных зерен определяли по формуле:

$$\varepsilon_c = a_1 \varepsilon_p,$$

где $a_1 = 1$ – постоянный коэффициент [7];

$\varepsilon_p = 0,5$ – интенсивность деформации при котором начинается формирования глобулярных зерен.

Объемная доля глобулярных зерен α -фазы вычисляли с использованием уравнение Аврами [7]:

$$X_{rex} = 1 - \exp \left[- \beta_d \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_{0,5}} \right)^k \right],$$

где β_d и k – константы материалов (значение констант материалов приведены в работе [7]);

$\Lambda_{0,5} = a_2 \dot{\varepsilon}^{m_1}$ – степень деформацию при котором проходит в структуре металла 50% рекристаллизации;

a_2 и m_1 – эмперические параметры, позволяющие определить влияние скорости деформации на формирование глобулярных зерен [7];

$\dot{\epsilon}$ - скорость деформации, с^{-1} .

Для вычисления среднего размера глобулярного зерна использовали формулу [7]:

$$d_{cp} = a_3 \Lambda^{n_1} \dot{\epsilon}^{m_2},$$

где a_3, n_1, m_2 - эмперические параметры учитывающие влияние скорости и степени деформации [7].

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам обработки металлов давлением (ОМД) представлено на рис. 8. Из рисунка видно, что после прокатки в гладких валках доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,463...0,741. При этом, из-за большой величины степени деформации сдвига в поверхностных зонах и зонах прилегающих к поверхностным зонам заготовки почти полностью проходит глобуляризация зерен. Однако, из-за малой величины степени деформации сдвига в центральных зонах заготовки не полностью проходит глобуляризация зерен.

После осадки в выпуклых бойках доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,843...0,982, т.е. из-за накопления степени деформации сдвига и умеренной скорости деформации по сечению заготовки почти полностью проходит глобуляризация зерен.

В процессе предварительной и окончательной изотермической штамповки зоны затрудненной деформации получают достаточную деформацию для того, чтобы структура полностью превратилась из ламеллярной в глобулярную.

Изменение среднего размера глобулярного зерна по переходам представлено на рис. 9. Наиболее интенсивное уменьшение среднего размера глобулярного зерна происходит в процессе прокатки в гладких валках (до 6,231...4,106 мкм) и при осадке в выпуклых бойках на гидравлическом прессе (до 2,512...1,718 мкм). После изотермической штамповки на кривошипном-горячештамповочном прессе образуется мелкозернистая однородная структура со средним размером глобулярного зерна 1,507...0,613 мкм.

Таким образом, в процессе штамповки по предлагаемому технологическому процессу глобуляризация зерен проходит практически во всем объеме поковки. При этом, после изотермической штамповки на КГШП получается мелкозернистая однородная микроструктура, которая способствует повышению пластичности, ударной вязкости, прочности.

Необходимо отметить, что предварительное фасонирование исходной листовой заготовки в выпуклых бойках позволяет действенным методом регулировать интенсивность деформаций в процессе изотермической штамповки. Применение конусообразной заготовки позволяет не только качественно перераспределить материал заготовки перед штамповкой, но и взаимоуравновесить сдвиговые усилия в штампе, тем самым избавиться от специальных тормозящих облойных канавок и увеличить ресурс штампа [8].

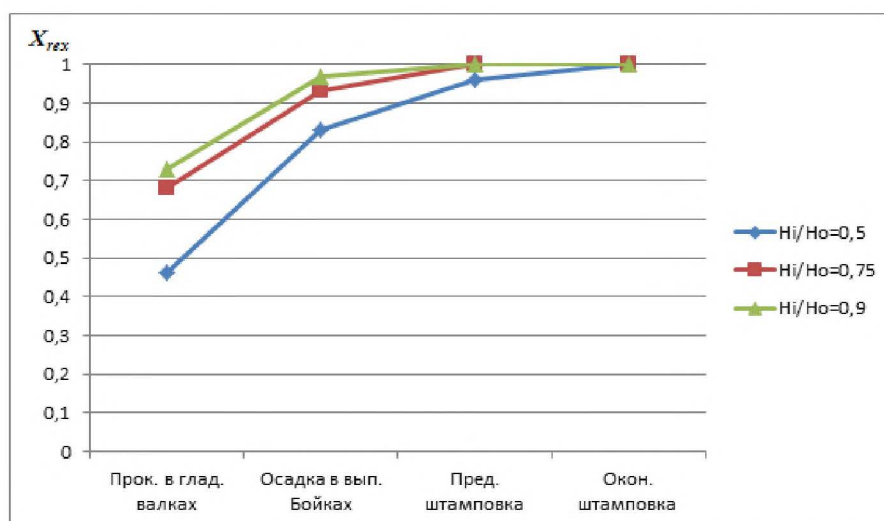


Рис. 8. График изменения объемной доли глобулярной структуры при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

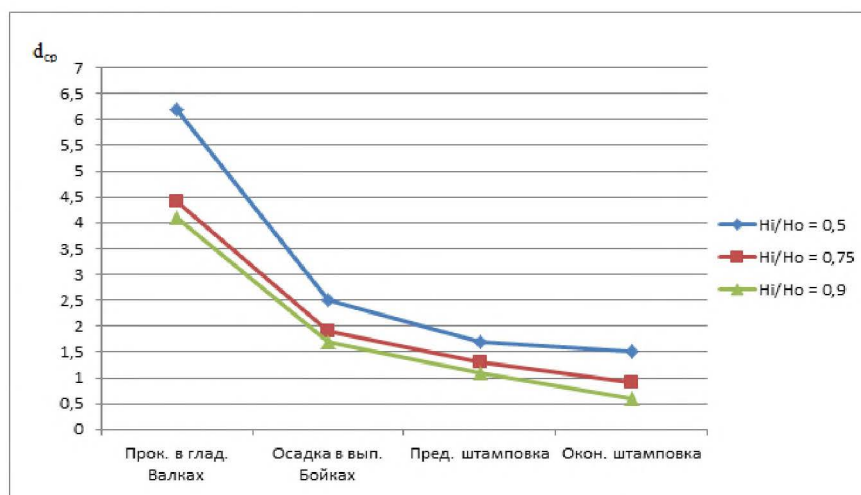


Рис. 9. График изменения среднего размера глобулярного зерна при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

Отсюда следует, что для получения компрессорных лопаток ответственного назначения из сплава VT6 можно рекомендовать их штамповку из предварительно фасонированной исходной листовой заготовки. Предварительное фасонирование в виде осадки исходной листовой заготовки в выпуклых бойках позволяет перераспределить материал исходной заготовки. Это, с одной стороны, минимизирует величину сдвиговых деформаций, вызывающих деформационный перегрев и недопустимое огрубление структуры металла, а с другой – уменьшает риск образования заковов и застойных зон, характерных для предварительной штамповки.

Выводы

4. Установлено, что сравнительно равномерное распределение Λ по сечению деформируемой заготовки можно достичь при прокатке в гладких валках на первом этапе, осадкой в выпуклых бойках на втором этапе и изотермической штамповкой на третьем этапе;
5. В процессе деформирования при температурах выше и ниже температуры полиморфного превращения ($T_{\text{шт}}$) в гладких валках и выпуклых бойках, а также изотермической штамповкой ниже $T_{\text{шт}}$ можно достичь мелкозернистую структуру;
6. Простота прокатки в гладких валках, предварительного фасонирования в выпуклых бойках и штамповки позволяет получать титановые поковки в штампах без увеличения их штамповочных уклонов.
7. Прокатка в гладких валках, осадка в выпуклых бойках на гидравлическом прессе и изотермическая штамповка на КГШП обеспечивает мелкозернистую однородную микроструктуру, с объемной долей глобулярной структуры равной 1,0, что обеспечивает высокие механические свойства.

Список литературы

1. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / – М.: МАКС Пресс, 2005. – 329 с.
2. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Технологияковки в инструменте с изменяющейся формой. - Павлодар: Издательство «Кереку», 2008. 634 с.
3. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Машекова А.С. Монография. Проблемыковки титановых сплавов и их решения. Часть 1 и 2 Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 230 с. и 251 с.
4. Палтиевич А. Р. Получение изделий с заданным комплексом механических свойств в процессах обработки металлов давлением с применением методов математического моделирования. Технология машиностроения, № 8 (74), С. 60 – 64.
5. Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учебное пособие. С-Пб: Институт Машиностроения, 2000. 217 с.
6. Белов М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД. - М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 1996. - С. 224-227.
7. Lopatin N. V., Maradudina O. N., and Dyakonov G. S. “Analysis of the Structure Formation and Properties of the VT6 Alloy during Upsetting of the Symmetrically Truncated Conical Billets”, Russian Journal of Non Ferrous Metals, 2011, Vol. 52, No. 1, 33–38.
8. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976. 560 с.