

SYMBOLS

AD	=	Open plane vane
AK	=	Open plane conic vane.
KD	=	Closed plane vane.
b_1	=	Vane height / (mm).
b_2	=	Vane height / (mm).
d_1	=	Internal diameter of the gear / (mm).
d_2	=	Internal diameter of the gear / (mm).
X	=	Gap width / (mm).
Z	=	Number of vanes.
B1	=	Vane inlet angle / ($^{\circ}$).
B2	=	Vane outlet angle / ($^{\circ}$).
Q	=	Flow rate / (m^3 / h).
Hm	=	Pump head / (m).
n	=	Efficiency / (%).
M	=	Moment / (Nm).
Δp	=	Pressure difference

References

1. Senoo Y, Ihsida, M, Deterioration of Compressor performance due to tip clearance of centrifugal impeller. Trans of the ASME, J of Turbo machinery vol 109, 1987.
2. Lauer J, 1 Tip clearance Sensitivity of centrifugal pumps with semi-open impellers. ASME Fluids Engn. Div. Summer Meeting FRDSM'97, 1997.
3. Yigit S. Theoric and experimental review on the gap losses of the open vane pumps used in the engines. Kocaeli University 1994.
4. Canbazoglu S. Polat M, Selection of optimum pump system and their adaptation to new working conditions. Erciyes University kayseri 1998.

УДК 669.35.074.669.539.5

УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Машеков С.А., д.т.н., проф. КазНТУ им. К.И. Сатпаева, Казахстан, г.Алматы, e-mail: mashekov.1957@mail.ru

Нургазаев А.Е., к.т.н., КазНТУ им. К.И. Сатпаева, Казахстан, г.Алматы

Нурахметова К. К., аспирант, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, г.Бишкек, e-mail: nurahmetova52@mail.ru

В статье путем компьютерного моделирования технологического процесса протяжки в плоских бойках и на радиально-ковочной машине, осадки в выпуклых бойках, а также изотермической штамповки определены рациональные режимы деформирования заготовок, позволяющие получить компрессорные лопатки с мелкозернистой структурой.

Ключевые слова: протяжка, осадка, бойки, заготовка, поковка, штамповка, лопатка.

The article by computer simulation of the process in drawing flat die and radial forging machine, 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, billet, forging, stamping, paddle.

Введение

В компрессорах высокого давления одной из основных деталей являются компрессорные лопатки. Как правило, они изготавливаются из титановых сплавов.

В настоящее время на машиностроительных заводах применяются следующие способы штамповки компрессорных лопаток [1]:

- Штамповка в один переход или с предварительной осадкой.
- С предварительной высадкой заготовок на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ).
- Штамповка с предварительной высадкой заготовок на электровысадочных машинах.
- Штамповка с предварительной вальцовкой заготовок.

- Изотермическая штамповка.

Рассмотрим более подробно каждый из вышеперечисленных видов.

Штамповка в один переход или с предварительной осадкой применяется в случае, когда размеры лопатки малы, а перепад площадей поперечных сечений велик, что затрудняет использование классических заготовительных переходов [2]. Данный способ обладает тем преимуществом, что штамповка, как правило, производится с одного нагрева, что позволяет уменьшить глубину альфированного слоя, но при этом повышается расход металла.

Штамповка с предварительной высадкой на ГКМ в настоящее время является наиболее распространенным способом фасонирования заготовок и позволяет снизить расход металла по сравнению со штамповкой в один переход [3]. Стержень высаженной этим способом заготовки имеет постоянное поперечное сечение, площадь которого выбирается по площади максимального сечения пера заготовки лопатки из условия устойчивости заготовки при высадке хвостовой части. Также необходимо учитывать допустимую степень деформации металла, что приводит к увеличению диаметра стержневой части при значительном перепаде площадей поперечного сечения пера и замковой части лопатки. Учитывая, что ГКМ, как правило, устанавливаются отдельно от прессов, то возникает необходимость дополнительного нагрева заготовок перед окончательной штамповкой, что приводит к увеличению альфированного слоя.

Электровысадка заготовок позволяет избежать дополнительного нагрева в печи перед фасонированием заготовки, поскольку нагрев производится непосредственно на электровысадочной машине, кроме того, во время данного процесса нагревается только деформируемая часть заготовки [3]. Электровысадка обладает рядом преимуществ перед операцией высадки на ГКМ:

- она не требует нагревательного оборудования (печи);
- поскольку время нагрева и высадки относительно невелико, то глубина альфированного слоя меньше;
- технологическая оснастка значительно проще и дешевле оснастки необходимой для операции высадки на ГКМ.

При электровысадке на диаметр высаженной части, как и при высадке на ГКМ, влияет допустимая степень деформации, что приводит к ограничению минимального диаметра стержневой части, а следовательно, к увеличению расхода металла.

Вальцовка позволяет получить заготовки с переменным сечением по длине заготовок, снизить расход металла и повысить трудоемкость, но данный процесс имеет и ряд недостатков [4]:

- как и штамповка на ГКМ, требует предварительного нагрева;
- для удержания заготовки необходимо предусмотреть необжимаемый участок длиной 0,4-0,5 диаметра, что не всегда представляется возможным;
- в процессе вальцовки возникает неконтролируемое удлинение обжимаемых частей заготовки.

В процессе изотермической штамповки в заготовке, инструменте и окружающем их ограниченном пространстве создается и постоянно поддерживается температура, обеспечивающая оптимальную пластичность металла обрабатываемой заготовки [5]. Деформирование осуществляется при малых скоростях, поэтому разупрочняющие процессы успевают протекать в его ходе, что повышает технологическую пластичность металла и резко снижает сопротивление пластическому деформированию. Учитывая, что деформирование протекает в условиях статического нагружения, для изготовления штампов можно использовать высокожаропрочные и износостойкие материалы с низкой пластичностью. Применение изотермической штамповки позволяет получать точные поковки с высоким коэффициентом использования металла. При изотермической штамповке, как правило, в качестве смазки применяют стеклосмазки, что позволяет защитить поверхность поковки от окисления и газонасыщения. Но при всех вышеперечисленных плюсах изотермическая штамповка имеет существенный недостаток: высокая длительность процесса деформирования.

Необходимо отметить, что задача получения качественных поволоков из титановых сплавов по вышеописанным технологиям осложняется из-за низкой теплопроводности титановых сплавов, узость температурного интервала их деформации и неравномерностью распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) по сечению поковки, приводящих к риску несоответствия структуры и свойств получаемых деталей заданным требованиям.

Известно [6], что сочетание современных методов математического моделирования и традиционных металлографических методов как инструментов анализа и прогнозирования структуры и свойств готовых поволоков позволяет существенно снизить расходы на освоение производства при одновременной гарантии их качества.

Цель работы: выявление путей улучшения качества компрессорных лопаток на базе математического моделирования технологического процесса штамповки. Основа метода заключается в количественное определение размеров зерен в зависимости от величины и распределения степени деформации сдвига в заготовке при совмещенном процессе ОМД.

Материалы и методика эксперимента

В работе предлагается новая технология изготовления поволоков компрессорных лопаток включающая нагрев заготовки в интервале температур 800-630 °С, протяжку в плоских бойках и на радиально-ковочной машине (РКМ), осадку в выпуклых бойках в интервале температур 800-750 °С и изотермическую штамповку при температуре 650°С.

Для расчета НДС использовали специализированную стандартную программу MSC.Super Forge [7]. Трехмерная геометрическая модель заготовки и инструментов была построена в САД программе Inventor и импортирована в САЕ программу MSC.SuperForge.

Для исследования совмещенного процесса изготовления компрессорных лопаток, как протяжка в плоских бойках и на РКМ, осадка в выпуклом инструменте, использовали заготовку размером $\varnothing 80 \times 400$ мм. совмещенный процесс моделировали в трехмерной среде с разбиением заготовки на 4-х узловые элементы (СТЕТРА). Для модели заготовки потребовалось 2219 элементов и 2962 узла. Материал заготовки титановый сплав BT6 с температурным диапазоном деформирования $630 \dots 1200^\circ\text{C}$. 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 абсолютно твердые тела.

Запускали программу «MSC.SuperForge». Шаговым методом рассчитывали перемещения U , компоненты тензора деформации ϵ , компоненты тензора скорости деформации ξ , компоненты тензора напряжения σ , интенсивность деформаций Γ , интенсивность напряжений σ_e , распределение температур по объему заготовки.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены картины распределения интенсивности деформаций по сечению заготовки при протяжке в плоских бойках при первом обжатии и при деформировании с углами кантовки 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° .

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

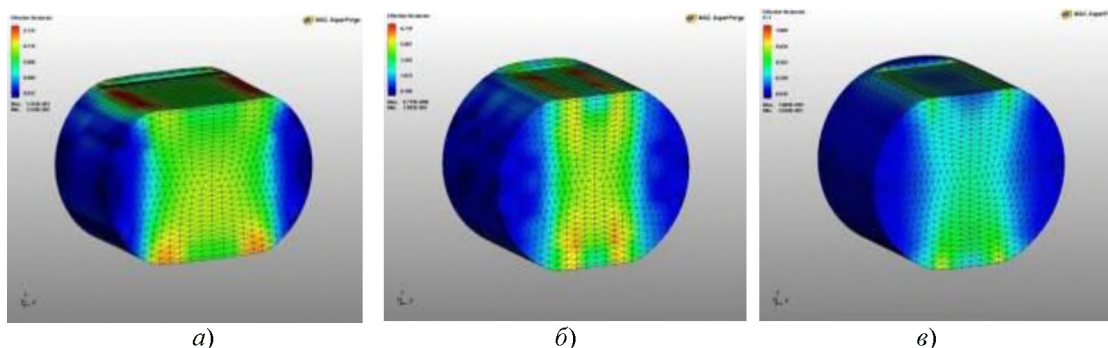
- при протяжке круглой заготовки в плоских бойках с относительными подачами $S = l/D = 0,6 \dots 1,0$ (где l – длина очага деформации; D – диаметр заготовки) интенсивность деформации локализуется на начальном этапе первого обжатия в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением обжатия локализуется по ковочному кресту (рис.1,а,б,в);

- при протяжке в плоских бойках с увеличением обжатия акцент деформации переносится в центр заготовки ($S = 1,0$), или максимальная по величине деформация сосредотачивается в средней зоне ($S = 0,8$) или близкой к поверхностной зоне ($S = 0,6$) заготовки;

- при протяжке в первом проходе с относительной подачей 1,0 и единичными обжатиями 20 %, из-за действия контактных сил трения часть объема геометрического очага деформации оказывается в зонах затрудненной деформации. При протяжке с относительной подачей 0,6...0,8 и единичным обжатием 20 %, небольшая часть объема геометрического очага деформации также оказывается в зонах затрудненной деформации;

- локализация деформации в зоне ковочного креста и в местах перехода от деформируемой к недеформируемой части заготовки приводит к повышению тепловыделения и опасности разрушения металла в этих зонах, с одной стороны, и к недостаточной деформации структуры в остальном объеме заготовки и к разнотекучности структуры по сечению, с другой стороны;

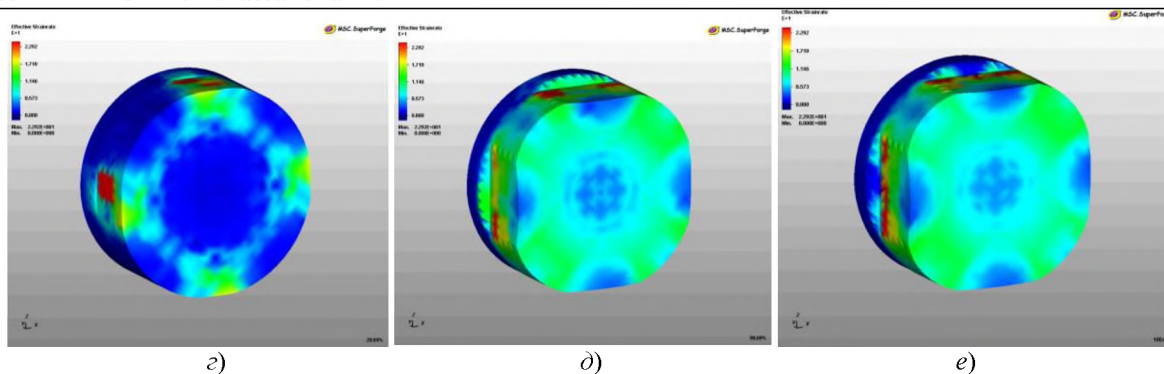
- кантовка заготовки на 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° и деформирование с обжатиями 10, 15 % независимо от величины относительной подачи приводит к локализации деформации на поверхности заготовки, а увеличение обжатия до 20 % позволяет сосредоточить деформации от поверхности до центра, при этом с увеличением обжатия происходит разворот участков с максимальными деформациями по сечению заготовки;



а)

б)

в)



$a - S = 1,0; b - S = 0,8; c - S = 0,6; d - \epsilon = 5\%; e - 10\%; e - 15\%$.

Рис. 1. Картина распределения интенсивности деформации в заготовке при протяжке в плоских бойках с единичным обжатием 20% (a,b,c) и на РКМ с единичными обжатиями 5% (d), 10% (e) и 15% (e) $t = 800^{\circ}\text{C}$

- при ковке круглой заготовки в плоских бойках с кантовкой $30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}, 150^{\circ}$ и 180° из-за разворота зон с максимальными деформациями по сечению заготовки интенсивно развиваются макросдвиговые деформации по очагу деформации, что будет приводить к интенсивному измельчению в структуре металла (рис.2);

- в процессе протяжки в плоских бойках в зонах локализации деформации повышается температура заготовок.

Путем суммирования интенсивности деформации произвели расчет степени деформации сдвига Λ (накопленной деформации) для ряда технологических режимовковки в плоских бойках.

Анализ эпюр изменения Λ по сечению заготовки при протяжке с кантовкой $30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}, 150^{\circ}$ и 180° и относительной подачей $S = l/D = 0,8...1,0$ показывает, что при рациональном режиме деформирования степень деформации сдвига имеет наибольшее значение в прилегающих к инструменту зонах заготовки, а также в центральных слоях заготовки. При этом в поверхностных участках имеются наименьшие значения (рис. 3, φ_1 – угол поворота до исследуемой точки по поперечному сечению заготовки; $\varphi_0 = 360^{\circ}$ – угол полной окружности заготовки).

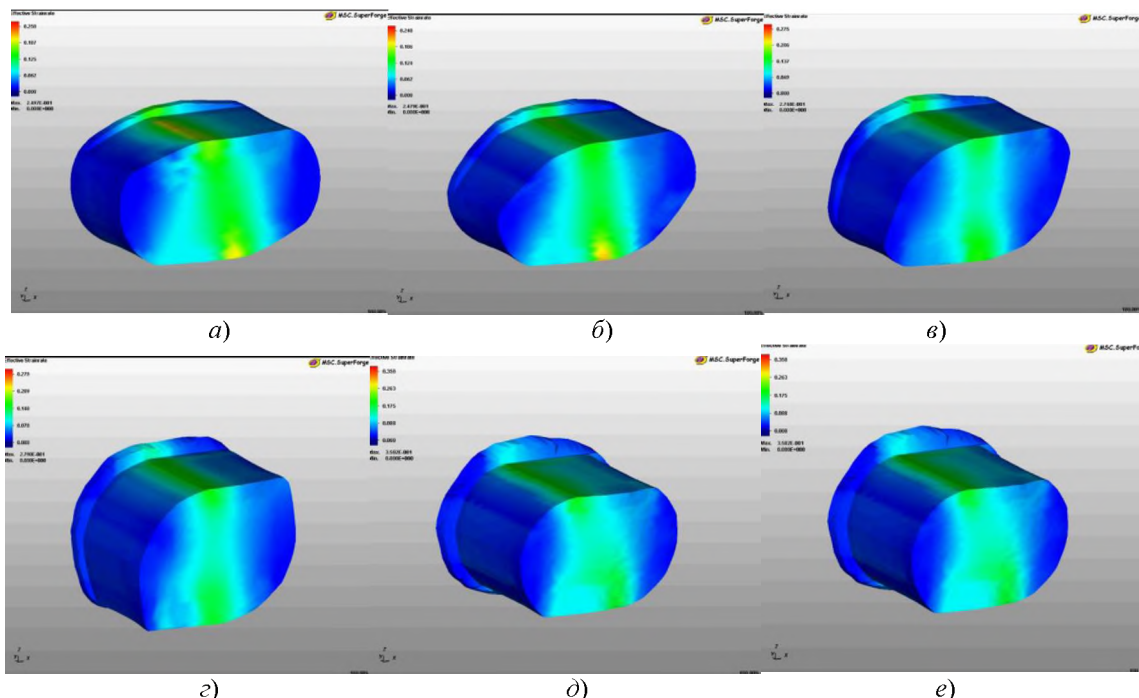


Рис. 2. Картина распределения интенсивности деформаций в заготовке при протяжке в плоских бойках с единичным обжатием 20% и с кантовкой 30° (a) и 60° (b), 90° (c) и 120° (d), 150° (e) и 180° (e)

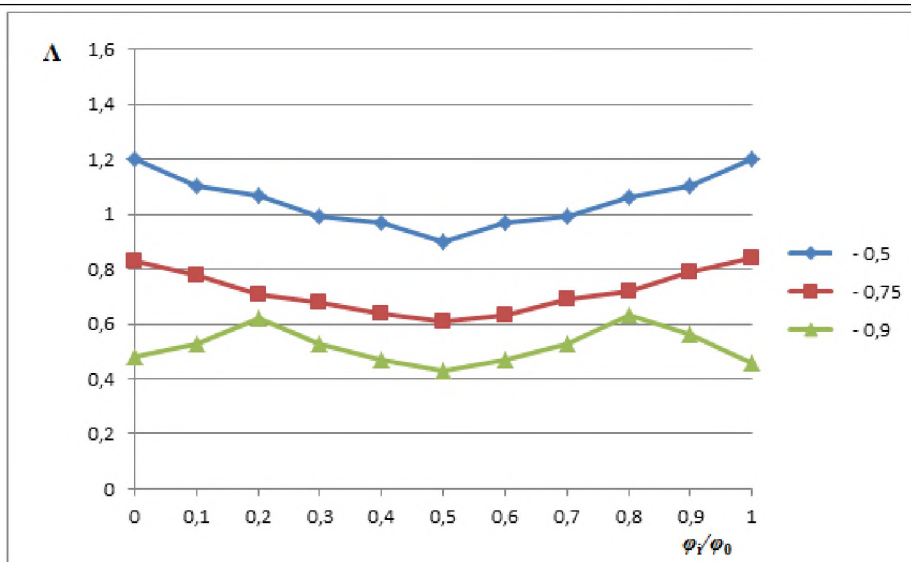


Рис. 3. Распределение Δ по продольному сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с относительной подачей 1,0 (\diamond - $\phi_i/\phi_0 = 0,5$; \square - $\phi_i/\phi_0 = 0,75$; Δ - $\phi_i/\phi_0 = 0,9$)

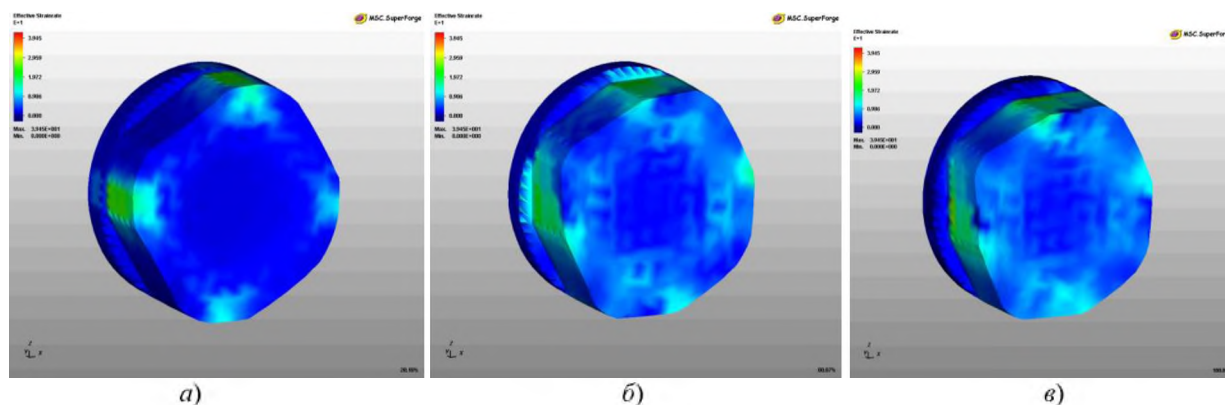
На рисунках 1 и 4 представлены картины распределения НДС по сечению заготовки при протяжке на РКМ с единичными обжатиями 5, 10 и 15 процентов и кантовками 30 и 60°.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что

- при протяжке круглой заготовки на РКМ интенсивность напряжения и деформации локализуется на начальном этапе первого обжатия в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением обжатия из-за возникновения силы трения акцент интенсивности напряжения переносится от поверхности к средней части радиуса заготовки (рис. 1, *з, д, е*);

- при первом обжатии прилегающих к инструменту зон поковки и ниже зоны соприкосновения плоского инструмента с заготовкой, интенсивность напряжения и деформации по величине является максимальной (рис. 1, *з, д, е*);

- деформирование с кантовкой на 30 и 60° позволяет сосредоточить интенсивность напряжений и деформации в зоне контакта металла с инструментом на начальном этапе обжатия, а при увеличении обжатия зоны с максимальной величиной интенсивности напряжения и деформации переносятся ближе к центру заготовки, при этом от поверхности до середины радиуса интенсивность деформации распределяется равномерно (рис. 4);



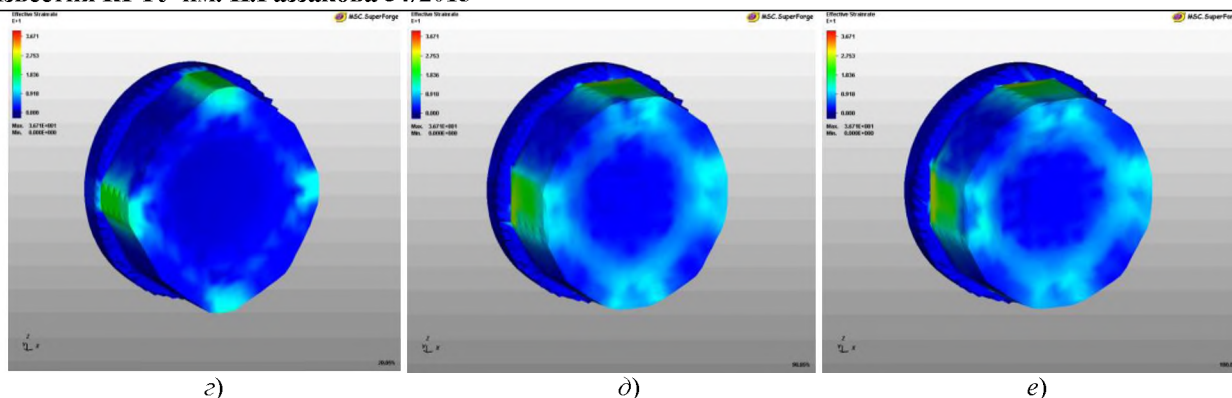


Рис. 4. Картина распределения интенсивности деформаций в заготовке при протяжке на РКМ с единичным обжатием 5% (а,з), 10 % (б,д), 15% (в,е) и кантовкой 30° (а,б,в) и 60° (з,д,е)

- в процессе протяжки на РКМ в зонах локализации напряжения и деформации температура повышается, а в центральной зоне заготовки понижается.

Анализ эпюр изменения Λ по сечению заготовки показывает, что при протяжке на РКМ с углом кантовки 30°, 60° степень деформации сдвига имеет большое значение на участках, прилегающих к поверхности заготовки, в то время как в центральной зоне заготовки – минимальную величину (рис. 5).

Таким образом, при ковке на РКМ интенсивность напряжения и деформации, а также степень деформации сдвига сосредотачиваются в поверхностных и средних зонах заготовки. Поэтому для получения поковки с равномерной структурой необходимо использовать совмещенный способ ковки РКМ с ковкой в плоских бойках, что позволяет совместно равномерно измельчить структуру исходной заготовки.

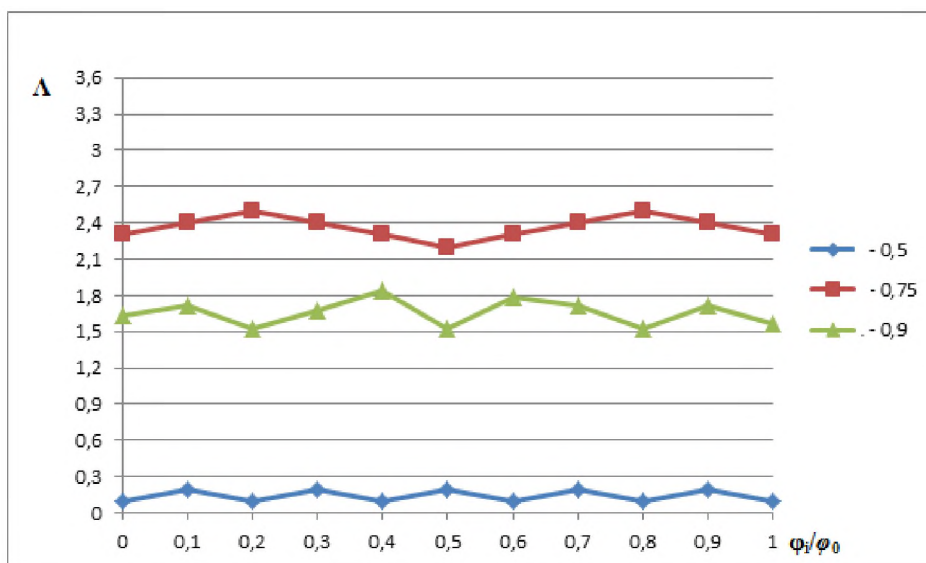


Рис. 5. Распределение Λ по продольному сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с относительной подачей 1,0 (\diamond - $\phi_1/\phi_0 = 0,5$; \square - $\phi_1/\phi_0 = 0,75$; Δ - $\phi_1/\phi_0 = 0,9$)

Необходимо отметить, что при протяжке в плоских бойках и на РКМ с уменьшением угла кантовки и единичного обжатия до 5...10 % величина Λ по всему сечению заготовки возрастает, что связано с увеличением количества обжатий. Это увеличение снижает производительность процесса ковки, поэтому для протяжки за один вынос (за один нагрев) с малыми углами кантовки и обжатиями необходим небольшой общий уков (1,25...1,6). При протяжке с большим общим уковом величину Λ невозможно увеличивать за счет уменьшения угла кантовки и единичного обжатия, так как при этом резко увеличивается количество ходов пресса или РКМ, что снижает производительность процесса ковки.

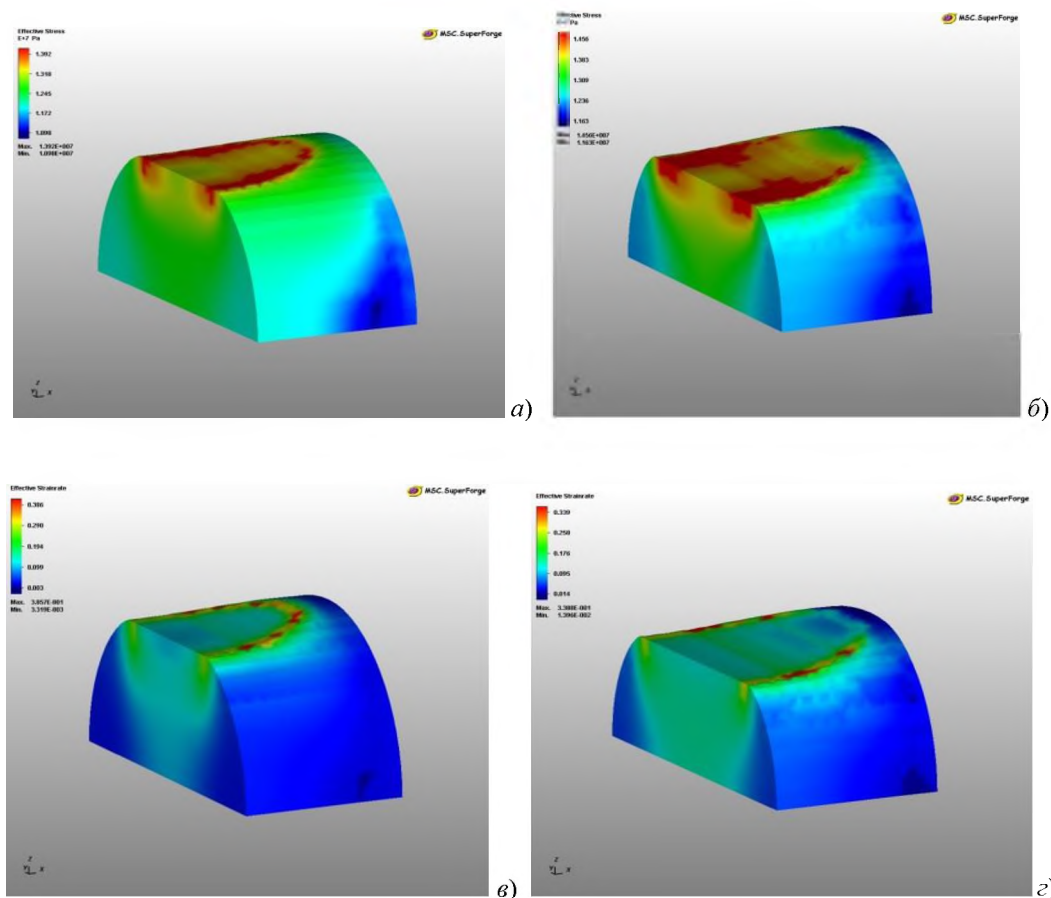
На рис. 6 представлены картины распределения интенсивности напряжений и деформаций в заготовке при выполнении операции осадки в выпуклых бойках.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- 1) В начальный момент осадки в выпуклых бойках интенсивность напряжения и деформации локализуется в контактных зонах заготовки с инструментом (рис. 6, а, в);
- 2) Увеличение единичного обжатия приводит к еще большему сосредоточению интенсивности напряжений и деформаций в контактной зоне заготовки, при этом Γ , σ_t увеличиваются в центре и периферийной

зоне 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) Характер скорости течения металла аналогичен развитию интенсивности деформации во времени.



$$a, v - \epsilon = 5\%; \quad b, z - \epsilon = 15\%$$

Рис. 6. Картина распределения интенсивности напряжения (а,б,в) и деформации (г,д,е) 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 поверхностных зонах заготовки, а также прилегающих к вертикальной оси участках заготовки (рис. 7 и 8).

Для исследования эволюции микроструктуры использовали модель глобуляризации титанового сплава ВТ6 по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову, полученную в работе [8]. По данной модели произвели расчет объемной доли и среднего размера глобулярных зерен титанового сплава ВТ6.

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

$$\epsilon_c = a_1 \epsilon_p,$$

где $a_1 = 1$ – постоянный коэффициент [8];

$\epsilon_p = 0,5$ – интенсивность деформации, при которой начинается формирование глобулярных зерен.

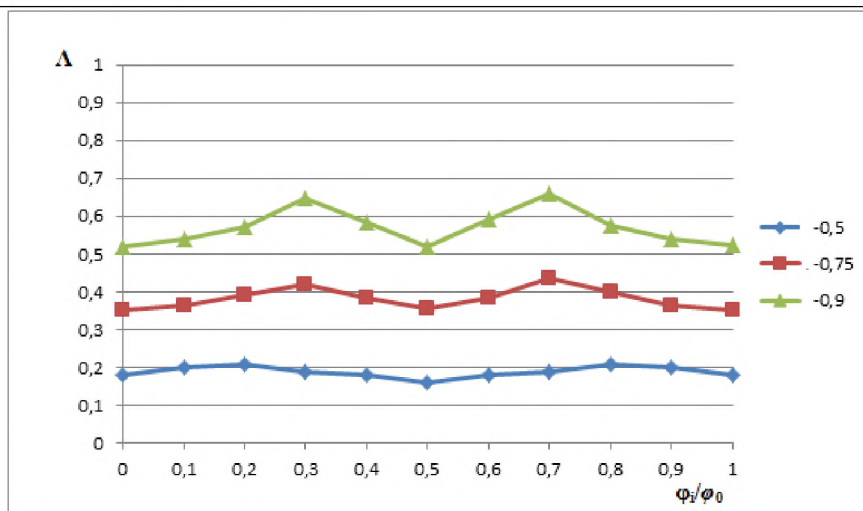


Рис. 7. Распределение Λ по поперечному сечению заготовки при осадке в выпуклых бойках ($L_1/L_0 = 0,5$, где L_1 – расстояние до исследуемой точки по длине заготовки; L_0 – длина заготовки)

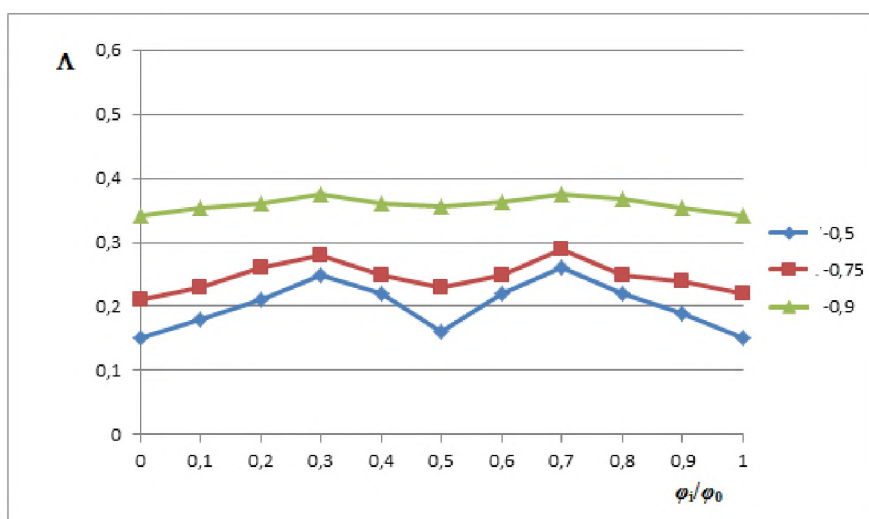


Рис. 8. Распределение Λ по поперечному сечению заготовки при осадке в выпуклых бойках ($L_1/L_0 = 0,8$, где L_1 – расстояние до исследуемой точки по длине заготовки; L_0 – длина заготовки)

Объемная доля глобулярных зерен α -фазы вычисляли с использованием уравнение Аврами [8]:

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

где β_d и k – константы материалов (значения констант материалов приведены в работе [8]);

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

a_2 и m_1 – эмпирические параметры, позволяющие определить влияние скорости деформации на формирование глобулярных зерен [8];

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

Для вычисления среднего размера глобулярного зерна использовали формулу [8]:

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

где a_3 , n_1 , m_2 – эмпирические параметры, учитывающие влияние скорости и степени деформации [8].

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам обработки металлов давлением (ОМД) представлено на рис. 9. Из рисунка видно, что после протяжки в плоских бойках доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,312...0,832. При этом из-за большой величины степени деформации сдвига в центральных и прилегающих к ним зонах заготовки почти полностью проходит глобуляризация зерен. Однако из-за малой величины степени деформации сдвига в поверхностных зонах заготовки не полностью проходит глобуляризация зерен.

После протяжки на РКМ и осадки в выпуклых бойках доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,922...0,992, т.е. из-за равномерного распределения степени деформации сдвига и умеренной скорости деформации по сечению заготовки почти полностью проходит глобуляризация зерен.

В процессе 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. 10. Наиболее интенсивное уменьшение среднего размера глобулярного зерна происходит в процессе протяжки в плоских бойках (до 3,93...9,427 мкм) и РКМ (до 2,825...4,31 мкм) и при осадке в выпуклых бойках на гидравлическом прессе (до 1,615...1,923 мкм). После изотермической штамповки на кривошипном-горячештамповочном прессе образуется мелкозернистая однородная структура со средним размером глобулярного зерна 0,523...0,732 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 [9].

Отсюда следует, что для получения компрессорных лопаток ответственного назначения из сплава ВТ6 можно рекомендовать их штамповку из предварительно фасонированной исходной ковальной заготовки. Предварительное фасонирование в виде осадки исходной ковальной 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.

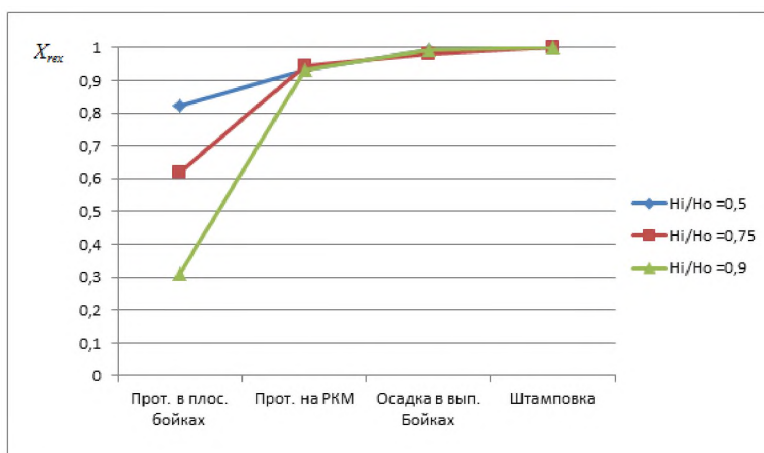


Рис. 9. График изменения объемной доли глобулярной структуры при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

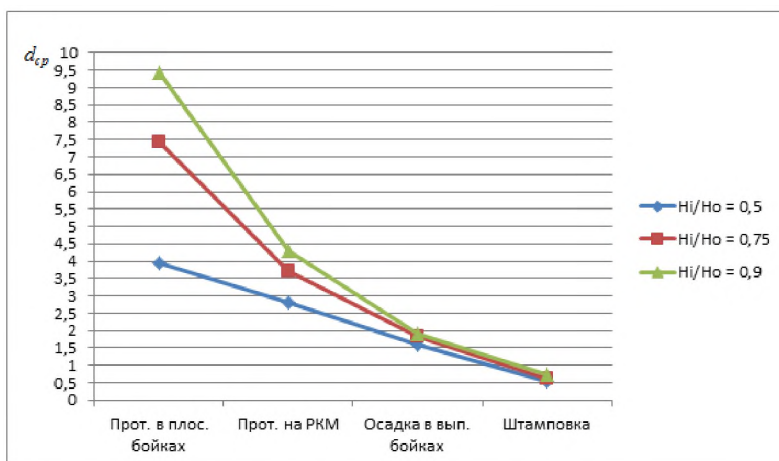


Рис. 10. График изменения среднего размера глобулярного зерна при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

Выводы

1. Установлено, что сравнительно равномерное распределение Λ по сечению деформируемой заготовки можно достичь протяжкой в плоских бойках на первом этапе, и ковкой на РКМ - на втором, осадкой в выпуклых бойках на третьем и изотермической штамповкой на заключительном этапе.
2. Протяжка в плоских бойках и на РКМ, осадка в выпуклых бойках на гидравлическом прессе и изотермическая штамповка на КГШП дают мелкозернистую однородную микроструктуру, с объемной долей глобулярной структуры, равной 1,0, что обеспечивает высокие механические свойства.
3. Методом конечных элементов и программой MSC.SuperForge получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС, температуры при моделировании протяжки в плоских бойках и на РКМ, а также осадки в выпуклых бойках.
4. Показано, что при протяжке в плоских бойках с кантовкой 30° , 60° , 90° , 120° , 150° и 180° и относительной подачей $S = l/D = 0,8...1,0$ степень деформации сдвига имеет наибольшее значение в центральных слоях заготовки, а при протяжке на РКМ с углом кантовки 30° , 60° - в поверхностных зонах заготовки.

Список литературы

1. Князев Я.О. Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины / Осадчий В.Я., Лянышин В.Б., Князев Я.О. // Заготовительное производство – 2013 – №3 с. 22-25.
2. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления /Ю.С. Кресанов, А.Я. Качан В.В. Чигиринский и др. – Вісник двигунобудування, Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2009, №2 –с.108115.
3. Князев Я. О. Разработка технологии штамповки поковок компрессорных лопаток авиационных газотурбинных двигателей из титанового сплава: диссертация кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки, - Орел, 2014.- 122 с.
4. Бuzдаев Ф. В. Вальцевание лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов с электроконтактным нагревом: диссертация кандидата технических наук по специальности , 05.07.05 – Тепловые двигатели летательных аппаратов, - Казань, 1998. – 115 с.
5. Шитарев И.Л., Хаймович А.И. Методы повышения ресурса компрессорных лопаток из $\alpha + \beta$ титановых сплавов при их высокоскоростной штамповке (ВСП) с нагревом заготовок выше точки полиморфных превращений //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. -Самара, 2012. - №3 (34), часть 4.- С. 34 - 40.
6. Шитарев И.Л., Хаймович А.И. Моделирование микроструктуры при высокоскоростной штамповке лопаток из титанового сплава VT9 // Заготовительные производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2011, №11. - С.41-44.
7. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазев А.Е. Технологияковки в инструменте с изменяющейся формой. - Павлодар: Издательство «Кереку», 2008. 634 с.
8. 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.
9. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976. 560 с.

References

1. Knyazev Ya.O. Innovative stamping compressor blades small length / Osadchiy VJ , Lenyashin VB, Knyazev Ya.O. // Blank production - 2013 - №3 with . 22-25 .
2. Influence of parameters of hot extrusion billet compressor rotor blades of the quality of their manufacturing /YU.S . Kresanov , AJ Kachan Vladimir Chigirinsky and others . - News dvigunobuduvannya , Zaporizhzhya : BAT "Motor Sich " , 2009 , №2 -s.108115 .
3. A. Knyazev Ya Technology Development stamping forgings compressor blades of aircraft turbine engines of a titanium alloy : the dissertation of the candidate of technical sciences , specialty 05.02.09 - Technology and equipment for processing - Eagle , 2014.- 122 p.
4. Buzdaev FV Rolling GTE compressor blades of titanium alloy with electro-contact heat : the dissertation of the candidate of technical sciences on specialty 05.07.05 - Thermal Aircraft Engines - Kazan, 1998. - 115 p.
5. Shitarev IL, Haimovich AI Methods of increasing the resource of compressor blades of $\alpha + \beta$ titanium alloys at high speed stamping (VCCP) with heating billets above the polymorphic transformations // Vestnik of Samara State Aerospace University. Acad. JV . Queen . -Samara , 2012. - №3 (34) , part 4.- pp 34 - 40 .
6. Shitarev IL, Haimovich AI Modelling of microstructure during high-speed punching blades of titanium alloy VT9 // Blank production in mechanical engineering . - М .: Mechanical Engineering , 2011 , №11. - S.41-44 .
7. Masek SA, Biyakaeva NT, Nurtazaev AE Technology forging tool with the changing shape . - Pavlodar : Publishing " Kerekou " , 2008. 634 pp.
8. Lopatin N. V., Maradudina O. N., and Dyakonov GS "Analysis of the Structure Formation and Properties of the VT6 Alloy during Upsetting of the Symmetrically Truncated Conical Billets", Russian Journal of Non Ferrous