

*Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Нурахметова К.К.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*S.A. Mashekov, A.E. Nurtazaev, K.K. Nurakhmetova*

### MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF STAMPING TURBINE BLADES MADE OF TITANIUM ALLOYS

УДК: 669.35.074.669.539.5

*В статье путем компьютерного моделирования технологического процессаковки в плоских и комбинированных бойках и на радиально-ковочной машине, а также высадки в инструменте с изменяющей формой определена рациональные режимы деформирования заготовок, позволяющие получить турбинные лопатки с мелкозернистой структурой.*

**Ключевые слова:** *протяжка, бойки, высадка, штамповка, лопатка.*

*In the article the rational modes of deformation of blanks was defined, allowed to get the turbine blades with a fine-grained structure. It was defined by computer simulation of the process of forging in flat and combined strikers and in the radial forging machine, as well as upset in the instrument with a changing shape.*

**Key words:** *broach, strikers, upset, stamping, blades.*

**Введение.** Турбинная лопатка является одной из наиболее важных деталей в машиностроении. В работе [1] предложена технология изготовления одной из таких деталей, как лопатки длиной 1016 мм из сплава с содержанием титана (6%), алюминия (4%), ванадия (Ti-6Al-4V) с улучшенными характеристиками по усталости и высокой размерной точностью. Аналогом данного сплава является титановый сплав BT6 (Ti-6,5Al-5,1V) стран СНГ. В данной работе для получения прутковых заготовок с мелкозернистой структурой и изготовление тонкой турбинной лопатки высокого качества предлагается использовать следующую технологическую схему.

Для проработки литой структуры, слиток нагревают до температуры выше температуры полиморфного превращения ( $T_{\text{пн}}$ ) и затем протягивают в плоских бойках с диаметра 840 мм на диаметр 470 мм. Для протяжки используют гидравлический пресс усилием 30 МН. Затем, чтобы получить мелкозернистую микроструктуру, заготовку нагревают до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и на прессе с тем же усилием протягивают в плоских бойках с диаметра 470 мм на диаметр 400 мм, после чего производят термообработку. Далее, чтоб получить тонкую и равномерную двухфазную микроструктуру, производят пластическую деформацию при незначительном количестве нагревов. Для решения этой задачи заготовку нагревают до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и производят ковку с диаметра 400 мм на диаметр 135 мм на радиально-ковочной машине (РКМ) фирмы GFM. Далее заготовку нагревают до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$

производят штамповку турбинных лопаток. При этом на бесшаботном молоте производят расплющивание прутковой заготовки. В результате расплющивания без скручивания получают промежуточную заготовку полосовидной формы. Затем заготовку нагревают до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и производят скручивание промежуточной заготовки. Скручивание заготовки полосовидной формы производят на гидравлическом прессе усилием 10 МН. На последнем этапе производят окончательную штамповку промежуточной заготовки на бесшаботном молоте.

Результаты анализа различных технологий [2,3] подготовки заготовок для штамповки поковок из титановых сплавов показывают, что на трудоемкость и производительность, а также на качество получаемых поковок сильное влияние оказывают физические свойства титановых сплавов, такие как низкая теплопроводность титана и его сплавов, активное взаимодействие титана и его сплавов с кислородом, азотом, водородом и кислородсодержащими газами атмосферы при нагреве, высокий коэффициент трения на поверхности контакта с инструментом.

Описанные выше особенности титановых сплавов приводят к необходимости минимизации времениковки, штамповки и создания условий для управляемой локализации деформации в центральном слое заготовки на первоначальном этапе деформирования и в поверхностном слое в последующем этапе обработки [2,3]. При этом грани заготовок необходимо периодически притуплять для ликвидации чрезмерного захлаживания углов поковки.

Необходимо отметить, что в вышеприведенной технологии для уменьшения поперечного сечения и увеличения длины слитков и промежуточных заготовок при ковке по схеме «квадрат-квадрат - круг» или «круг-квадрат-круг» широко используют протяжку в плоских бойках. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) металла при ковке в плоских бойках показывает, что деформация локализуется по ковочному кресту, а максимальная деформация сосредоточивается в центральной зоне заготовки [2,3]. При этом в прилегающих к инструменту зонах поковки возникают значительные контурные растягивающие напряжения и деформации, которые при ковке поковок из титановых сплавов могут привести к нарушению сплошности металла. Известно, что

неравномерное распределение НДС приводит к структурной неоднородности кованных прутков.

Как показала практика производства штампованных поковок дисков и лопаток из титановых сплавов, сам процесс штамповки оказывает огромное влияние на формирование структуры и структурной неоднородности в силу неравномерности распределения деформации в поковках из-за разной формы и соотношения размеров фигуры окончательного или заготовительного штампа и заготовки [2,3]. Кроме того, как отмечалось ранее, большую роль в увеличении неоднородности структуры играют неравномерное температурное поле в объеме поковки, скоростные режимы деформации и режимы охлаждения поковок.

На основе анализа литературных данных, для получения качественных поковок нами предлагается использовать следующую технологию изготовления турбинных лопаток:

1. Нагрев слитка до температуры выше  $T_{\text{пн}}$  и протяжка в плоских бойках с относительной подачей  $S = l/D = 0,8$  (где  $l$  – длина очага деформации;  $D$  – диаметр заготовки) по схеме «круг - круг» с диаметром 840 мм на диаметр 500 мм;

2. Нагрев заготовки до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и протяжка в комбинированных бойках (верхний – плоский, нижний – вырезной) с относительной подачей  $S = 0,6$  по схеме «круг - круг» с диаметром 500 мм на диаметр 400 мм;

3. Отжиг при температуре выше  $T_{\text{пн}}$ ;

4. Нагрев промежуточной заготовки до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и протяжка с диаметра 400 мм до диаметра 135 мм по схеме «круг - круг» на РКМ фирмы GFM;

5. Отрезка из прутковой заготовки мерной заготовки, обточка данной заготовки на соответствующую длину и диаметр, ультразвуковой контроль на отсутствие дефектов;

6. Нагрев промежуточной заготовки до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и ковка мерной заготовки на ступенчатый профиль на управляемой от ЧПУ радиально-ковочной машине фирмы GFM;

7. Высадка части ступенчатой заготовки в инструменте с изменяющей формой гидравлического пресса усилием 10 МН;

8. Расплющивания прутковой заготовки на бесшаботном молоте;

9. Скручивание промежуточной заготовки на гидравлическом прессе усилием 10 МН;

10. Окончательная штамповка промежуточной заготовки на бесшаботном молоте и получение турбинных лопаток с точными размерами.

В работе была поставлена задача провести имитационное моделирование предлагаемой технологии и рассчитать НДС заготовки в процессековки.

#### Материалы и методика эксперимента

Для расчета НДС использовали специализированную стандартную программу MSC.Super Forge [4]. Трехмерная геометрическая модель заготовки и бойка была построена в CAD программе Inventor и импортирована в CAE программу MSC.SuperForge. При создании конечно-элементной модели заготовки и бойка был использован трехмерный объемный элемент STETRA (четырёхузловой тетраэдр).

Для расчета использовали цилиндрический образец размером  $\varnothing 80 \times 400$  мм. Из базы данных материалов назначили материал протягиваемой заготовки титановый сплав ВТ6 с температурным диапазоном деформирования 630...1200°C и инструментальную сталь. Для моделирования пластичности материала заготовки выбрали упругопластическую модель Джонсона-Кука. Контакт между бойком и заготовкой смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3.

#### Результаты и обсуждение

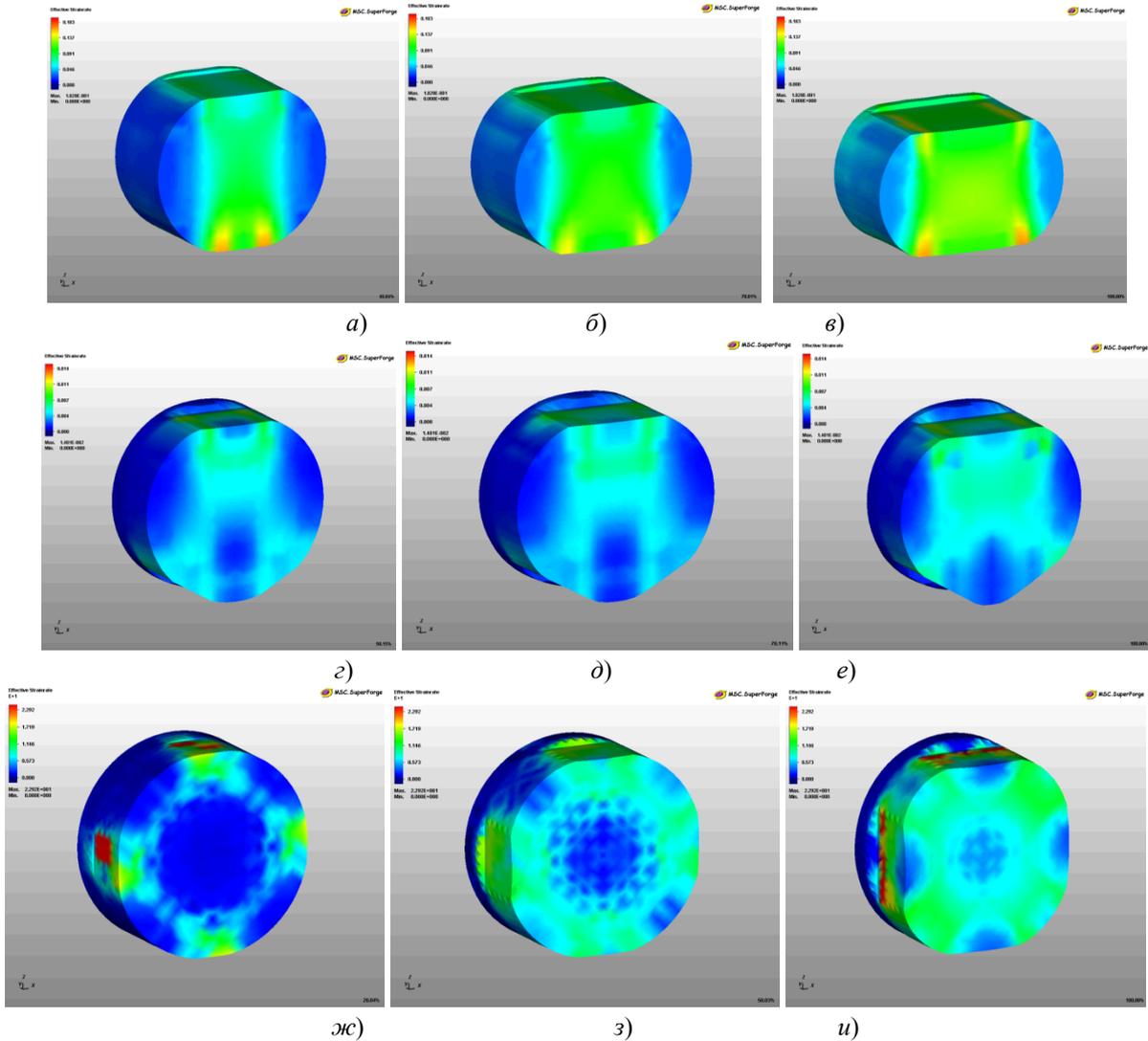
На рис. 1 и 2 представлены картины распределения интенсивности деформаций по сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с относительной подачей  $S = 0,8$  при первом обжатии и при деформировании по схеме «круг - круг» с углами кантовки 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- при протяжке круглой заготовки в плоских бойках интенсивность деформации локализуется на начальном этапе первого обжатия в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением обжатия локализуется по ковочному кресту, при этом максимальная по величине деформация локализуется в центре заготовки (рис. 1, а, б, в);

- при протяжке в первом проходе с относительными подачами 0,8 и единичными обжатиями 20%, из-за действия контактных сил трения, часть объема геометрического очага деформации 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 разнородности структуры по сечению, с другой стороны;



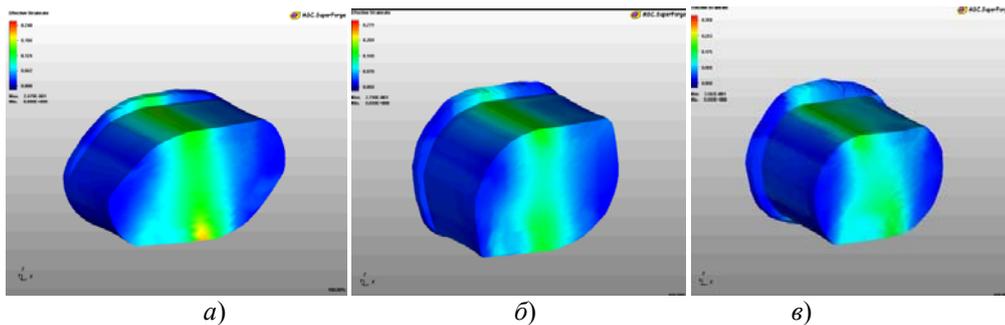
*а, з, жс* –  $\varepsilon = 10\%$ ; *б, д, з* –  $\varepsilon = 15\%$ ; *в, е, и* –  $\varepsilon = 20\%$

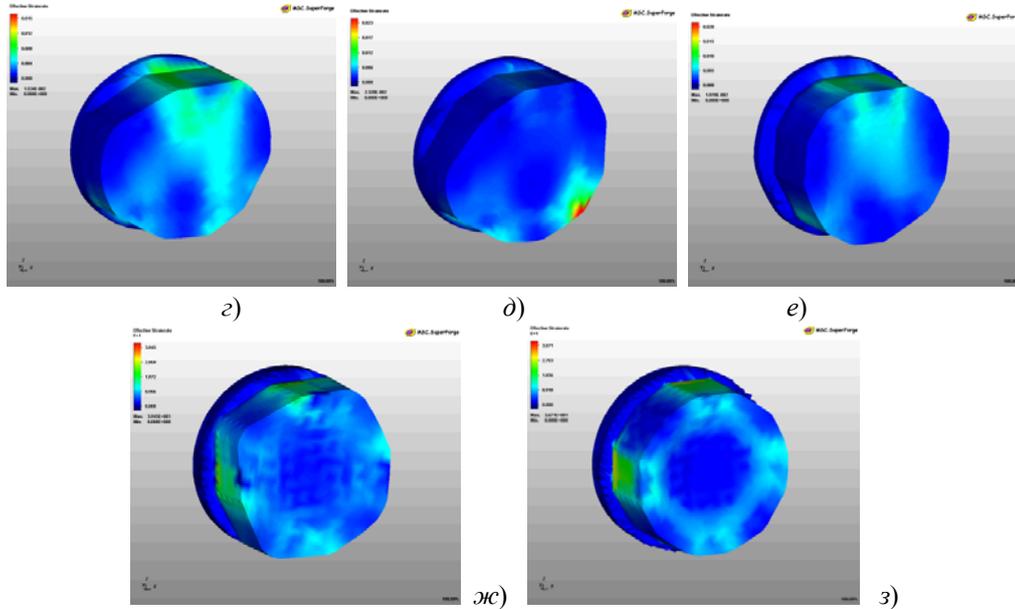
**Рис. 1.** Картина распределения интенсивности деформации по сечению заготовки при протяжке в плоских (*а, б, в*) и комбинированных (*з, д, е*) бойках и на РКМ (*жс, з, и*)

- кантовка заготовки на  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  и деформирование с обжатиями 10...15% 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 (рис. 2, *а, б, в*);

- при ковке круглой заготовки в плоских бойках с кантовкой  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  и  $180^\circ$  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 *а, б, в*);

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

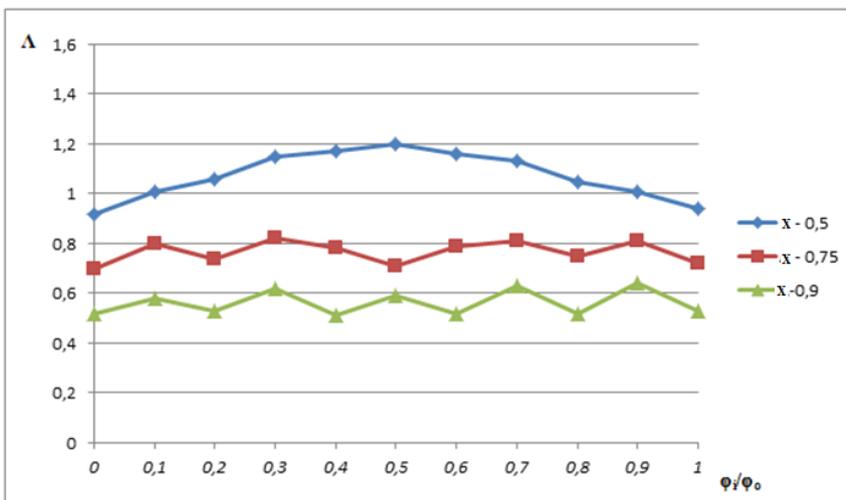




**Рис. 2.** Картина распределения интенсивности деформаций по сечению заготовки при протяжке с единичным обжатием 20% и углами кантовками 60° (а), 120° (б), 180° (в) в плоских бойках и с углами кантовками 30° (г), 90° (д), 120° (е) в комбинированных бойках, а также с кантовками 45° (ж), 90° (з) на РКМ.

Путем суммирования интенсивности деформации произвели расчет степени деформации сдвига  $\Lambda$  (накопленной деформации) для протяжки в плоских бойках.

Анализ эпюр изменения  $\Lambda$  по сечению заготовки при протяжке с кантовкой 30°, 60°, 90°, 120°, 150° и 180° и относительной подачи  $S = l/D = 0,8$  показывает, что при рациональном режиме деформирования степень деформации сдвига имеет наибольшее значение в центральных зонах заготовки (рис. 3, где  $\varphi_i$  – угол поворота до исследуемой точки по поперечному сечению заготовки;  $\varphi_0 = 360^\circ$  – угол полной окружности заготовки).



**Рис. 3.** Распределение  $\Lambda$  по продольному сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с относительной подачей 0,8 ( $\Delta$  -  $D_i/D_0 = 0,9$ ;  $\square$  -  $D_i/D_0 = 0,75$ ;  $\diamond$  -  $D_i/D_0 = 0,5$ ;  $D_i$  – расстояние до исследуемой точки по диаметру;  $D_0$  – диаметр заготовки)

Картины распределения интенсивности деформации по сечению заготовки при протяжке в комбинированных бойках с относительной подачей  $S = 0,6$  в первом обжатии и при деформировании с углами кантовки 30°, 60°, 90° и 120° представлены на рис. 1 и 2.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- при первом обжатии в комбинированных бойках интенсивность деформаций имеет большое значение на участках, прилегающих к участку контакта инструмента с заготовкой, в то время как в свободных от нагрузки поверхностных участках заготовки возникают минимальные по величине деформации;

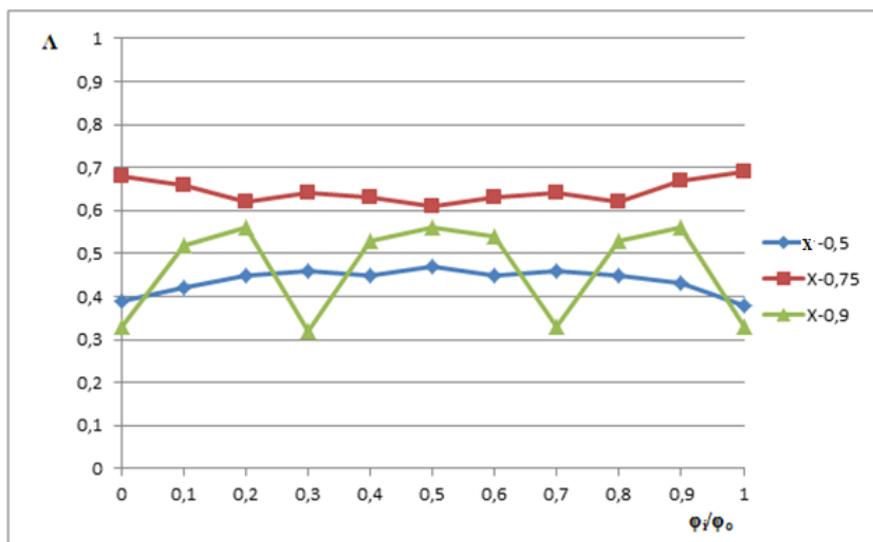
- при протяжке круглой заготовки в комбинированных бойках интенсивность деформации сосредотачиваются в начальном этапе первого обжатия в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением обжатия интенсивность деформации локализуется в центральных зонах заготовки (рис. 1, г, д, е);

- увеличения единичного обжатия при протяжке в комбинированных бойках приводит к расширению зон локализации интенсивности деформации;

- в процессе протяжки с кантовкой 30°, 60°, 90°, 120° интенсивность деформации сосредотачивается под плоским бойком (рис. 2, г, д, е);

- в процессе протяжки в комбинированных бойках в зонах локализации деформации повышается температура заготовкой.

Анализ эпюр изменения  $\Delta$  по сечению заготовки при протяжке в комбинированных бойках показывает, что при наиболее рациональном режиме протяжки с относительной подачей 0,6 и углом кантовки  $30^\circ$  степень деформации сдвига имеет большое значение на участках, прилегающих к центральной зоне заготовки (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение  $\Delta$  по продольному сечению заготовки при протяжке в комбинированных бойках с относительной подачей 0,6 ( $\Delta - D_i/D_0 = 0,9$ ;  $\square - D_i/D_0 = 0,75$ ;  $\diamond - D_i/D_0 = 0,5$ );

На рисунках 1 и 2 представлены картины распределения НДС по сечению заготовки при протяжке на РКМ с обжатиями 10, 15, 20% и кантовками  $45^\circ$  и  $90^\circ$ .

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что

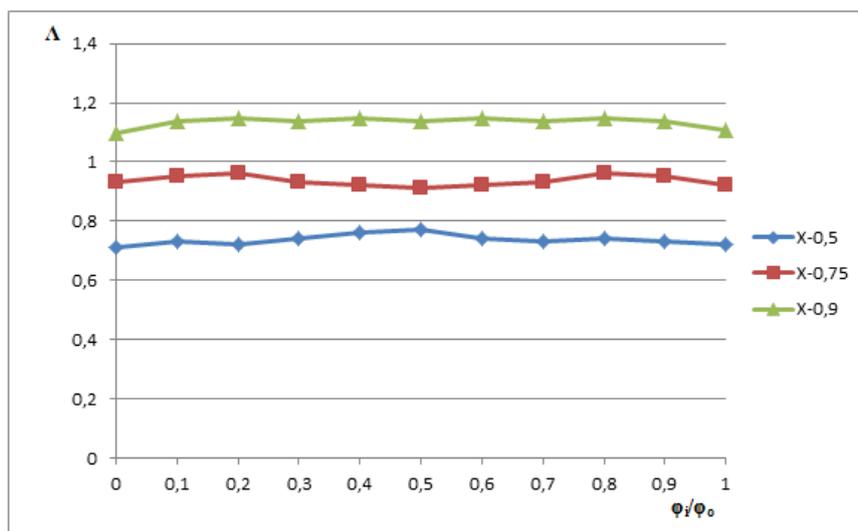
- при протяжке круглой заготовки на РКМ интенсивность деформации локализуются на начальном этапе первого обжатия в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением обжатия из-за возникновения силы трения акцент интенсивности деформации переносится от поверхности к средней части радиуса заготовки (рис.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

- при первом обжатии прилегающих к инструменту зонах поковки и в зонах, ниже зоны соприкосновения плоского инструмента с заготовкой, интенсивность деформации по величине являются максимальными (рис. 1 ж,з,и);

- протяжка на РКМ с кантовкой на  $45^\circ$  и  $90^\circ$  позволяет сосредоточить интенсивность деформации в зоне контакта металла с инструментом на начальном этапе обжатия, а при увеличении обжатия акцент зоны с максимальной величиной интенсивности деформации перенести ближе к центру заготовки (рис. 2 ж,з);

- в процессе протяжки на РКМ в зонах локализации деформации температура повышается, при этом в зоне контакта инструмента с заготовкой температура понижается.

Анализ эпюр изменения  $\Delta$  по сечению заготовки показывает, что при протяжке на РКМ с углом кантовки  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  степень деформации сдвига имеет большое значение на участках, прилегающих к поверхности заготовки, в то время как в центральной зоне заготовки – маленькую величину (рис. 5).



**Рис. 5.** Распределение  $\Delta$  по продольному сечению заготовки при протяжке на РКМ ( $\Delta - D_i/D_0 = 0,9$ ;  $\square - D_i/D_0 = 0,75$ ;  $\diamond - D_i/D_0 = 0,5$ )

На рис. 6 представлены картины распределения интенсивности деформаций по сечению заготовки при высадке в инструменте с изменяющей формой.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

1) в начальный момент высадки в инструменте с изменяющейся формой интенсивность деформации локализуются в контактных зонах заготовки с инструментом (рис. 6, а, б, в);

2) увеличение единичного обжатия приводит к переносу акцента интенсивности деформаций от контактной поверхности к периферии высаживаемой части заготовки (рис. 6, а, б, в);

4) в процессе высадки в зонах локализации деформации повышается температура;

5) с увеличением единичного обжатия максимальная величина контактного давления переносится от оси к периферии заготовки;

6) характер скорости течения металла аналогичен распределению интенсивности деформации по сечению высаживаемой заготовки;

7) при высадке в инструменте с изменяющейся формой приращение степень деформации сдвига распределяется равномерно по сечению высаживаемой части заготовки;

8) благодаря меньшей контактной поверхности и благоприятным условиям трения деформирующие усилие при высадке в инструменте с изменяющимся формой рабочей поверхности почти в 10 раз меньше, чем при обычной высадке.

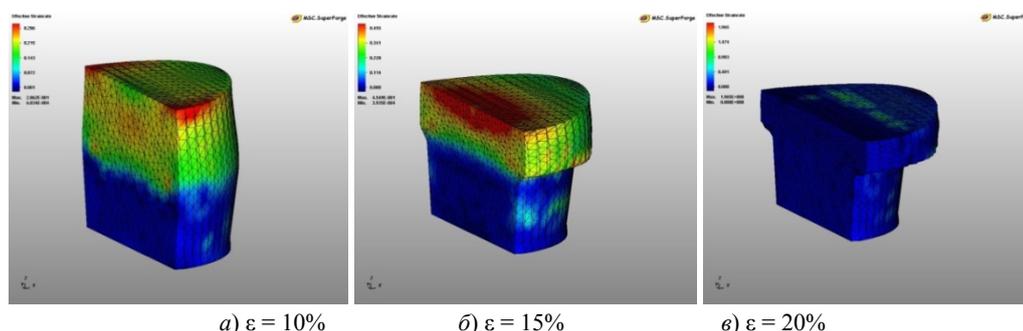


Рис. 6. Картина распределения интенсивности деформаций (а, б, в) в заготовке при высадке в инструменте с изменяющейся формой,  $t = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для исследования эволюции микроструктуры использовали модель глобуляризации титанового сплава ВТ6 по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову, полученная в работе [5]. По данной модели произвели расчет объемную долю и средний размер глобулярных зерен титанового сплава ВТ6.

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

$$\varepsilon_c = a_1 \varepsilon_p,$$

где  $a_1 = 1$  – постоянный коэффициент [5];

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

Объемная доля глобулярных зерен  $\alpha$ -фазы вычисляли с использованием уравнение Аврами [5]:

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

где  $\beta_d$  и  $k$  – константы материалов (значение констант материалов приведены в работе [5]);

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

$a_2$  и  $m_1$  – эмпирические параметры, позволяющие определить влияние скорости деформации на формирование глобулярных зерен [5];

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

Для вычисления среднего размера глобулярного зерна использовали формулу [5]:

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

где  $a_3$ ,  $n_1$ ,  $m_2$  – эмпирические параметры учитывающие влияние скорости и степени деформации [5].

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам обработки металлов давлением (ОМД) представлено на рис. 7. Из рисунка видно, что после протяжки в плоских бойках доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,301...0,502. Таким образом, из-за большой температуры деформации и умеренной скорости деформации по сечению заготовки частично проходит глобуляризация. При этом, из-за возникновение трения и, вследствие этого, появление зон затрудненной деформации в поверхностных зонах заготовки почти не проходит глобуляризация зерен. Кроме того, в зонах располагающихся между поверхностными и центральными зонами заготовки также не полностью проходит глобуляризация.

После протяжки в комбинированных бойках и отжига при температуре выше  $T_{\text{нп}}$  доля глобулярных зерен по сечению заготовки составляет 0,626...0,821. Таким образом, из-за накопления степени деформации сдвига при умеренной скорости деформации и отжига при температуре выше  $T_{\text{нп}}$  по сечению

заготовки почти полностью проходит глобуляризация зерен.

В процессе протяжки на РКМ зоны затрудненной деформации получают достаточную деформацию для того, чтобы структура полностью превратилась из ламеллярной в глобулярную.

Таким образом, высадке и изотермической штамповке подвергаются заготовки имеющие глобулярную структуру. Такая высадка и штамповка позволяет получить поковку с глобулярной структурой, что повышает механические свойства. Кроме того, получение глобулярной структуры снижает анизотропию свойств сплава ВТ6.

Изменение среднего размера глобулярного зерна по переходам представлено на рис. 8. Наиболее интенсивное уменьшение среднего размера глобулярного зерна происходит после протяжки в комбинированных бойках, отжига и протяжки на РКМ (до 1,239...2,134 мкм) и при высадке на гидравлическом прессе (до 1,074...1,246 мкм). После изотермической штамповки на кривошипном-горячештамповочном прессе образуется мелкозернистая однородная структура со средним размером глобулярного зерна 0,501...0,734 мкм.

Результаты расчета степени деформации сдвига показали, что равномерное распределение  $\Lambda$  по сечению деформируемой заготовки можно достичь при протяжке с углом кантовки 30°, 60°, 90°, 120°, 150° и 180° и относительной подачей 0,8 в плоских бойках на первом этапе, с углом кантовки 30°, 60°, 90°, 120° и относительной подачей 0,6 в комбинированных бойках на втором этапе и с углом кантовки 45° и 90° на РКМ в третьем этапе.

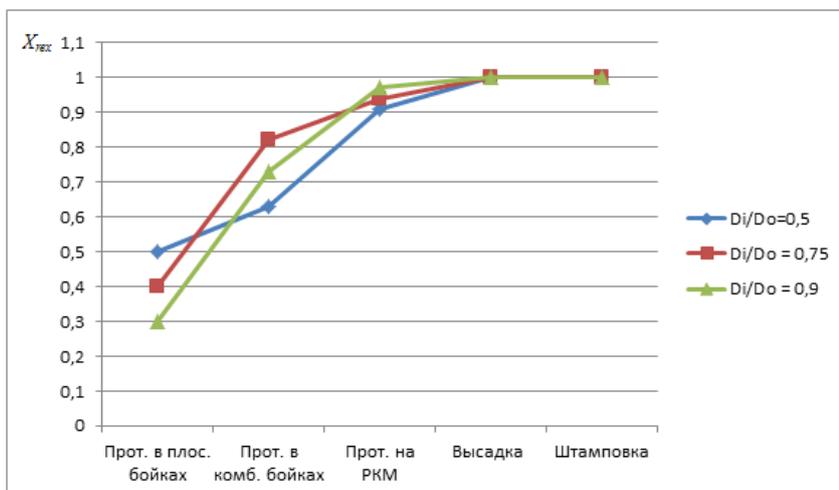


Рис. 7. График изменения объемной доли глобулярной структуры при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

После по этапной протяжкой круглой заготовки в плоских и комбинированных бойках, а также на РКМ можно получить поковку с мелкозернистой структурой с высокими механическими свойствами.

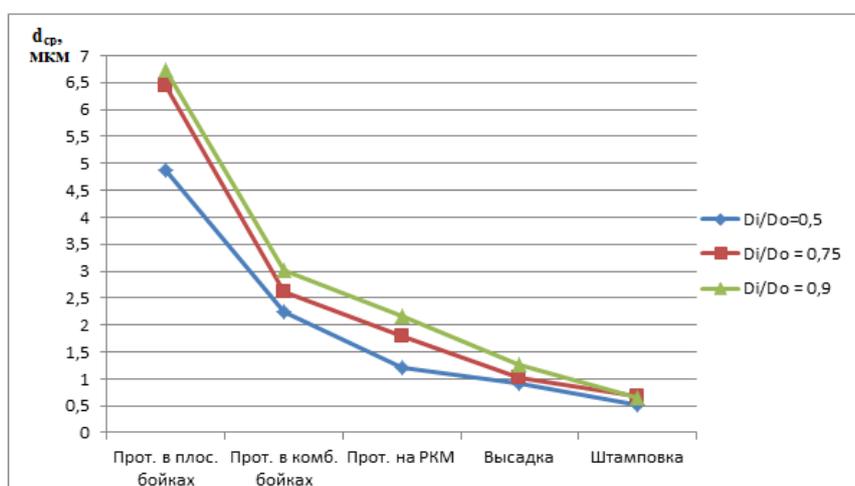


Рис. 8. График изменения среднего размера глобулярного зерна при изготовлении лопаток совмещенным процессом ОМД

Таким образом, ковкой и изотермической штамповкой на КГШП можно получить турбинные лопатки с мелкозернистой однородной микроструктурой. Данная структура способствует повышению пластичности, ударной вязкости, прочности получаемой деталей.

### Выводы

1. Установлено, что равномерное распределение  $\Lambda$  по сечению деформируемой заготовки можно достичь при протяжке с углом кантовки 30°, 60°, 90°, 120°, 150° и 180° и относительной подачей 0,8 в плоских бойках на первом этапе, с углом кантовки 30°, 60°, 90°, 120° и относительной подачей 0,6 в комбинированных бойках на втором этапе и с углом кантовки 45° и 90° на РКМ в третьем этапе;

2. В процессе протяжки при температурах выше и ниже  $T_{ин}$  в плоских и комбинированных бойках, а также на РКМ можно достичь полностью глобулярную структуру;

3. Ковка в плоских и комбинированных бойках, а также на РКМ, высадка в инструменте с изменяющей формой и изотермическая штамповка на КГШП обеспечивает мелкозернистую однородную микроструктуры, с объемной долей глобулярной структуры равной 1,0, что обеспечивает высокие механические свойства.

**Литература:**

1. [Aviapanorama.su/wp-content/uploads/2009/05/20.pdf](http://aviapanorama.su/wp-content/uploads/2009/05/20.pdf)
2. 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.
3. Чепкин В.М. Опыт и проблемы применения титановых сплавов в авиационных двигателях // Титан. 1995. № 1-2 (5-6). С. 13-15.
4. 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.
5. 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.

**Рецензент: д.т.н., профессор Тусупбеков М.Р.**

---