



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-97-100>  
УДК 621.735.043, 57.089–03; 57.089: 616–7

Поступила 15.11.2022  
Received 15.11.2022

## ШТАМПОВКА СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

*В. А. ТОМИЛО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stamila@rambler.ru*  
*А. Ю. ИЗОБЕЛЛО, Н. Г. КОЗЫРЕВ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: nixonchik95@gmail.com*  
*А. Л. МАНЦИВОДА, ОАО «Минский автомобильный завод», г. Минск, Беларусь*

*На примере процесса получения полуфабрикатов компонентов эндопротезов коленного сустава продемонстрированы этапы получения сложнопрофильной поковки. Дан сравнительный анализ получения одного и того же изделия из разных сплавов. Приведена методика и представлены результаты определения энергосиловых параметров горячей объемной штамповки труднодеформируемых сплавов VT1-0 и Co-Cr-Mo. Определена типовая схема технологического процесса изготовления поковок с удлиненной осью и значительными перепадами толщин, характерными для эндопротезов.*

**Ключевые слова.** Штамповка, сложнопрофильная деталь, труднодеформируемый сплав, эндопротез.

**Для цитирования.** Томило, В. А. Штамповка сложнопрофильной детали из труднодеформируемых сплавов / В. А. Томило, А. Ю. Изобелло, Н. Г. Козырев, А. Л. Манцивода // *Литье и металлургия*. 2022. № 4. С. 97–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-97-100>.

## STAMPING OF A COMPLEX PROFILE PART MADE OF HARD-TO-FORM ALLOYS

*V. A. TAMILA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: stamila@rambler.ru*  
*A. Yu. IZOBELLO, N. G. KOZYREV, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: nixonchik95@gmail.com*  
*A. L. MANTSIVODA, Minsk Automobile Plant, Minsk, Belarus*

*Using the example of the process of obtaining semi-finished components of knee joint endoprotheses, the stages of obtaining a complex profile forging are demonstrated. A comparative analysis of obtaining the same product from different alloys is given. The methodology is given and the results of determining the energy-power parameters of hot volumetric stamping of hard-to-form VT1-0 and Co-Cr-Mo alloys are presented. A typical scheme of the technological process of manufacturing forgings with an elongated axis and significant thickness differences characteristic of endoprotheses is determined.*

**Keywords.** Stamping, complex profile part, hard-to-form alloy, endoprosthesis.

**For citation.** Tamila V. A., Izobello A. Yu., Kozyrev N. G., Mantsivoda A. L. Stamping of a complex profile part made of hard-to-form alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 97–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-97-100>.

Штамповка (штампование) – процесс пластической деформации материала с изменением формы и размеров тела. Деформация происходит за счет воздействия пуансона на деталь с нужным усилием, ограниченным мощностью прессы и прочностью оснастки. Исходя из названия, труднодеформируемые сплавы имеют большее сопротивление деформации. Получение сложнопрофильных деталей осуществляется за несколько переходов, для меньшей нагрузки на пресс и оснастку.

Рассмотрим данный процесс, а именно направление разработки полуфабрикатов компонентов эндопротезов коленного сустава (ЭКС). Существует много конструкций эндопротезов коленного сустава, представленных на рынке изделий медицинского назначения разными производителями. При многочисленных конструктивных особенностях и различных уровнях сложности все ЭКС объединяет общий признак – наличие трех основных компонентов: феморального (ФК), устанавливаемого на окончании бедренной кости, тиббиального (ТК), прикрепляемого к верхнему торцу большеберцовой кости, и профильной прокладки, располагаемой между ФК и ТК на тиббиальном компоненте.

Материалом для ФК и ТК в большинстве случаев служат Со-Сг-Мо-сплавы, а для прокладки – высокомолекулярный полиэтилен. Прокладка является изолятором между ФК и ТК от возможных электрических биотоков и одновременно антифрикционным элементом, по профильной поверхности которого происходит скольжение соответствующей поверхности феморального компонента при сгибании – разгибании коленного сустава.

По технологии соединения компонентов ЭКС с костями ноги протезы делятся на цементные и бесцементные. В настоящее время большинство ЭКС делают из кобальт-хром-молибденовых сплавов и при имплантации для надежного скрепления используют медицинский цемент.

При изготовлении компонентов из титановых сплавов контактирующие с костями ноги поверхности ФК и ТК подвергают специальной подготовке с нанесением и спеканием титанового порошка, что после операции обеспечивает врастание костной ткани в эти поверхности. В таком случае применение цемента не требуется.

ФК и ТК в большинстве конструкций механически между собой не связаны, а удерживаются в нужном положении мышцами и связками ноги.

Титановые сплавы существенно дешевле кобальт-хром-молибденовых, легче обрабатываются резанием и обладают лучшей биосовместимостью, однако в большинстве случаев применяют все же Со-Сг-Мо-сплавы. Это вызвано тем, что последние обладают высокой прочностью и износостойкостью в литом состоянии, а титановые отливки имеют пониженный уровень механических свойств. Необходимость применения для полуфабрикатов ФК и ТК технологии литья обусловлена сложной формой компонентов.

В практике эндопротезирования имеют место и сборные конструкции компонентов ЭКС (главным образом, для ревизионных операций). Такие конструкции позволяют использовать титановые сплавы и ощутимо удешевлять изделия, делая их более доступными. По этому направлению и проводили исследования.

Процесс получения ЭКС состоит из трех операций: прямое выдавливание; высадка основания поковки тиббиального компонента; горячее выдавливание боковых штырей на основании.

Предварительно нужно совершить компьютерное моделирование формообразования элементов поковки тиббиального компонента (ТК). Разработанная технологическая схема получения поковки ТК была промоделирована посредством компьютерной программы «QForm». Выполненные расчеты усилий также протестированы данной программой. Результаты тестирования показали правильность выполненных расчетов, после чего была разработана и изготовлена макетная оснастка для апробирования формообразования отдельных элементов ТК. На основе поэлементного моделирования были получены данные для разработки рабочей конструкторской документации опытной оснастки для трех операций формообразования поковки тиббиального компонента наибольшего типоразмера:

- штамп для выдавливания стержня тиббиального компонента;
- штамп для высадки основания тиббиального компонента;
- устройство для выдавливания штырей тиббиального компонента.

На основе принятой трехоперационной схемы и разработанной технологической оснастки был выпущен экспериментальный технологический процесс.

### Операция первая – прямое выдавливание

Поковка после первой операции (рис. 1) представляет собой гранатовидную фигуру, состоящую из стержня и головки, между которыми имеется конический переходный участок под углом  $45^\circ$ . Стержневая часть в результате первой операции получает окончательные размеры поковки, а головка служит для последующего формообразования основания и штырей.

Для расчета усилия деформации на первой операции и выбора оборудования необходимо прежде всего определить степень деформации как один из главных факторов сопротивления металла формообразованию.

Усилие деформации ( $P$ ):

$$P = K_n K_\phi F, \quad (1)$$

где  $P$  – удельное давление при деформации,  $\text{кг/мм}^2$ ;  $F$  – площадь сечения контейнера,  $\text{мм}^2$ ;  $K_n$  – коэффициент пластичности материала по отношению к бы-

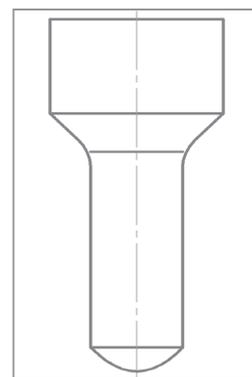


Рис. 1. Поковка после первой операции

строрежущей стали Р6М5;  $K_{\phi}$  – коэффициент формы; для цилиндрических заготовок  $K_{\phi} = 1$ ; для заготовок со сложной формой поперечного сечения  $K_{\phi} = 1,1 - 1,2$ .

Пресс выбирают с паспортным усилием  $P_{ном.} \approx 2P$ .

По графику (рис. 2) определяем давление деформации для стали Р6М5К5.

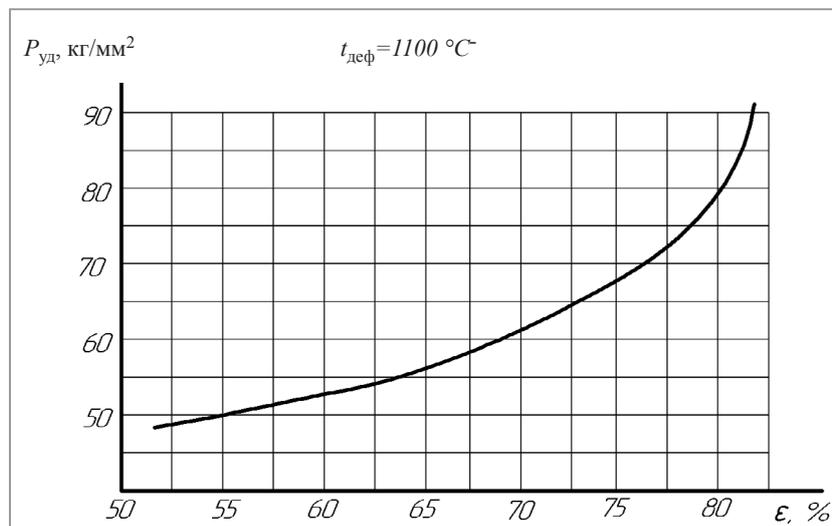


Рис. 2. Зависимость давления деформации от степени деформации

В соответствии с методикой определения усилия горячего выдавливания оно составляет:

$$P_{\text{деф.}} = p F_{\kappa} K, \tag{2}$$

где  $p$  – давление деформации;  $F_{\kappa}$  – площадь контейнера, мм<sup>2</sup>;  $K$  – отношение предела текучести деформируемого материала к пределу текучести стали Р6М5К5 (в нашем случае  $\frac{\sigma_m^{BT1-0}}{\sigma_m^{P6M5K5}}$ ).

**Операция вторая – высадка основания поковки ТК**

В результате этой операции должна получиться промежуточная поковка (рис. 3), соответствующая по габаритным размерам и контурам готовой поковке, но без штырей. Вместо штырей на основании образованы напуски, используемые в последующем для локального выдавливания штырей. Высадка основания поковки ТК выполняется в профильном контейнере профильным пуансоном. Для выбора оборудования к операции высадки основания выполнен расчет усилия деформации.

Для условий осадки усилие деформации определяют по формуле:

$$P_{\text{деф.}} = \sigma_T F_1^{\text{max}} K, \tag{3}$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, кг/мм<sup>2</sup>;  $F_1^{\text{max}}$  – конечная площадь осаживаемой заготовки, мм<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент влияния формы матрицы ( $K=1-10$ ).

В нашем случае процесс высадки состоит из двух стадий: свободная осадка; осадка с ограничением перемещения металла вследствие контакта его со стенками контейнера, при этом усилие может резко возрастать.

**Операция третья – горячее выдавливание боковых штырей на основании**

Эта операция выполняется по новой технологии, разработанной в рамках данного проекта. Данный метод заключается в локальном наложении усилий деформации к напускам на участках изделия, соответствующих положению штырей на основании ТК.

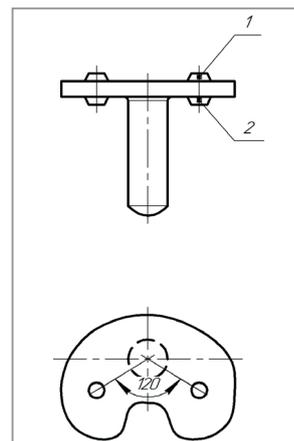


Рис. 3. Промежуточная поковка после высадки основания: 1 – верхние напуски под выдавливание штырей; 2 – нижние напуски под выдавливание штырей

Усилие деформации на третьей операции определяем по формуле:

$$P_{\text{деф.}} = pF_{\text{лок.}}KK_1n,$$

где  $p$  – давление деформации, кг/мм<sup>2</sup>;  $F_{\text{лок.}}$  – локальная площадь приложения усилия деформации, мм<sup>2</sup>;

$$K = \frac{\sigma_{\text{T}}^{\text{BT1-0}}}{\sigma_{\text{T}}^{\text{P6M5K5}}};$$

$K_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий особые условия выдавливания.

Хотя одной из целей проекта является уход от кобальт-хром-молибденовых сплавов при изготовлении ТК в пользу титановых, для наглядности и сравнения был выполнен расчет усилий деформации при формообразовании ТК и для Co-Cr-Mo-сплава.

Для поковки ТК из Co-Cr-Mo-сплава принята такая же трехоперационная технологическая схема, как для поковки из Ti сплава: прямое горячее выдавливание центрального стержня – высадка основания – прямое горячее выдавливание боковых штырей. В нашем случае существенным отличием будет значительно более высокое (в 2–3 раза) сопротивление деформации Co-Cr-Mo-сплава по сравнению со сплавом BT1–0. Поэтому специальные расчеты не требуются – достаточно показатели усилий деформации по операциям умножить на 3, в результате получим максимальные расчетные усилия для Co-Cr-Mo-сплава (см. таблицу).

Сравнительные усилия горячей деформации сплавов

| Номер операции | Операция   | BT1–0       |            | Co-Cr-Mo    |            |
|----------------|--|-------------|------------|-------------|------------|
|                |  | усилие, т с | пресс, т с | усилие, т с | пресс, т с |
| 1              | Прямое горячее выдавливание центрального стержня | 31,3        | 100        | ~94         | 250        |
| 2              | Высадка основания                                | 35,3        | 160        | ~116        | 250 (400)  |
| 3              | Прямое горячее выдавливание боковых штырей       | 27,4        | 100        | ~82         | 160        |

Как видно из таблицы, использование схемы при деформировании Co-Cr-Mo-сплава требует существенного увеличения мощности оборудования. Однако проблема не только в этом. Вторая операция формообразования (высадка основания) требует высокой степени деформации, которая составляет 75,5%. Очевидно, что за один ход пресса эту операцию для Co-Cr-Mo-сплава выполнить невозможно из-за его низкой пластичности, потребуются несколько переходов в рамках одной операции; возможно потребуются дополнительный подогрев поковки между переходами. Количество их можно определить, выполнив экспериментальную осадку образцов с разными степенями деформации.

На третьей операции (выдавливание боковых штырей) суммарное усилие деформации составит 82 тс, т.е. нагрузка на один пуансон будет достигать 41 тс. При диаметре пуансона 16 мм площадь его рабочего торца равна 201 мм<sup>2</sup>, давление сжатия в момент наибольшей нагрузки достигнет 204 кг/мм<sup>2</sup>. Такие усилия предопределяют особо высокие требования к материалу пуансонов и его термообработке [1].

### Выводы

Получение сложнопрофильных деталей из труднодеформируемых сплавов за одну операцию, не учитывая литые, практически невозможно, выполняя при этом выставленные требования к изделию. На примере процесса получения полуфабрикатов компонентов эндопротезов коленного сустава продемонстрированы этапы получения сложнопрофильной детали, а также проведен сравнительный анализ получения одного и того же изделия из разных сплавов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий А. В., Ломать Л. Н., Борисов А. В., Мухля А. М. Организация работы ортопедо-травматологической службы в Республике Беларусь: достижения и перспективы // Междунар. науч.-практ. журнал. Хирургия. Восточная Европа, приложение «IX съезд травматологов-ортопедов Республики Беларусь с международным участием». 2014. С. 3–10.

### REFERENCES

1. Beletskiy A. V., Lomat L. N., Borisov A. V., Mukhlya A. M. Organization of the work of the orthopedic and trauma service in the Republic of Belarus: achievements and prospects. International scientific and practical journal. Surgery. Eastern Europe, Appendix "IX Congress of Traumatologists and Orthopedists of the Republic of Belarus with International Participation", 2014, pp. 3–10.