

УДК 621.771.074

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ВАЛЬЦОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВКИ ПОД ШТАМПОВКУ ПОКОВКИ ДЕТАЛИ «ГАЕЧНЫЙ КЛЮЧ» КАК СПОСОБ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

© 2025 С.А. Рогулин, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 24.01.2025

Обсуждаются результаты исследования операции вальцовки поковки детали «гаечный ключ» в секторных инструментах ковочных вальцов и выбора необходимых формы и размеров полуфабрикатов для сокращения технологических отходов в виде облоя. С помощью компьютерных экспериментов в программном комплексе DEFORM-3D найдены рациональные параметры ручьев секторов-штампов, а также размеры исходной заготовки для осуществления вальцовки.

Ключевые слова: горячее деформирование, моделирование, профилированная заготовка, вальцовка, сектор-штамп.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-147-154

EDN: VXZLTQ

В операциях обработки металлов давлением, в частности, при горячем деформировании важную роль играет выбор исходной заготовки с такими параметрами, которые могут обеспечить полное заполнение ручьев инструмента, обеспечив наибольшую экономию материала. В некоторых технологических процессах изготовления той или иной конечной поковки требуются заготовительные операции, выполняемые в подкатных и протяжных ручьях молотовых штампов. При штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) необходимы предварительно профилированные полуфабрикаты на соответствующем оборудовании, в качестве которого используют станы поперечно-винтовой [1], радиально-сдвиговой [2] и поперечно-клиновой прокатки, а также ковочные вальцы и для которых необходимо спроектировать и изготовить инструмент с заданными формой и размерами ручьев.

Представленные в статье материалы являются расширением возможностей операции вальцовки [3] поковки детали «гаечный ключ» в секторах-штампах с параметрами калибров, обеспечивающих максимальный коэффициент использования металла (КИМ) при условии полного заполнения окончательного ручья штампа КГШП. Предметом исследования является гаечный ключ двухсторонний с открытым зевом 17×19 ГОСТ 2839-80 [4], в качестве материала которого используется конструкционная легированная сталь марки 40ХФА ГОСТ 4543-2016 [5]. Исходная заготовка под операцию вальцовки получена по методике, приводимой в работе [6], исходя из чертежа поковки «гаечный ключ» по условию постоянства объема и имеет следующие размеры [7]: диаметр $\varnothing$ мм и длина $136 \pm 0,5$ мм.

По результатам проведенного компьютерного моделирования скорректированы размеры калибров для изготовления профилированного полуфабриката, что позволит в дальнейшем получить поковку с наименьшим количеством технологических отходов в виде облоя, при этом, длина исходной заготовки уменьшена до значения $122 \pm 0,5$ мм при неизменном диаметре.

Вальцовка полуфабриката для последующей штамповки поковки детали «гаечный ключ» производится в двух ручьях постоянного сечения и имеет последовательность калибров «круг – овал» и «овал – круг». На рисунке 1 а, б показаны сечения ручьев, размеры которых получены аналитическими расчетами [6]. Размеры поперечных сечений калибров секторов-штампов позволяют определить параметры глубины вреза и длины ручьев, руководствуясь источником [8].

В ходе проведения компьютерного моделирования был спрогнозирован повышенный выход металла в облой преимущественно в центральной области профилированной заготовки. Участок будущей рукоятки ключа формуется предварительно в овальном калибре, а затем в калибре круглого сечения, поэтому их размерные характеристики уточнены. Скорректированные размеры сечений калибров представлены на рисунке 1 в, г.

Операция вальцовки проводится на ковочных вальцах открытого типа модели СА1335 с консольным расположением валов, рабочие части которых укомплектованы шпонками, сами вальцы снабжены упором. Для данного оборудования разработаны новые более надежные способы крепления секторов-штампов на рабочих валах [9-11] и для их реализации оригинальные конструкции оснастки [12-14].

Рогулин Сергей Александрович, аспирант кафедры СПД. E-mail: serzh.rogulin2013@yandex.ru

Сосенушкин Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов. E-mail: sen@stankin.ru

Яновская Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики.

E-mail: elena_yanovskaya@bc.ru

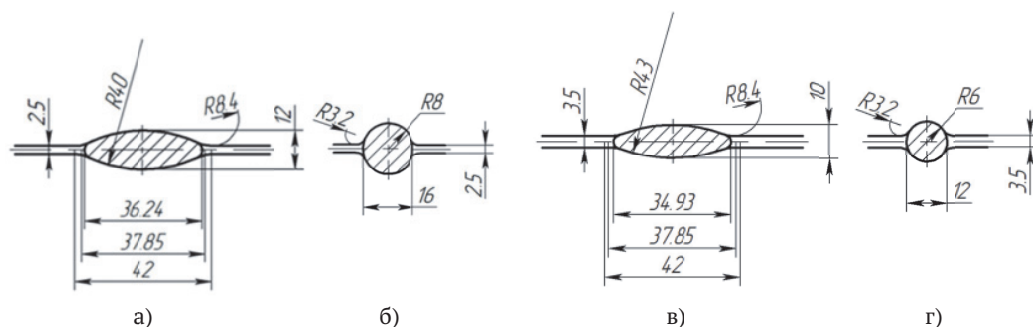


Рис. 1. Калибры, полученные аналитическими расчетами – овальный (а); круглый – (б) и их скорректированные размеры – овального (в) и круглого – (г) калибров

Исследование операции вальцовки проводилось с помощью компьютерного моделирования [15] в программном комплексе DEFORM-3D, основой которого является метод конечных элементов. В качестве исходных данных вводились параметры: температура исходной заготовки 1250 °С; скорость вращения рабочих валов 1,08 с⁻¹. Температура секторов-штампов 250 °С; материал секторов-штампов - инструментальная штамповая сталь марки 5ХНМ ГОСТ 4543-2016 [5].

Результаты моделирования позволяют получить визуальное представление об изменяемой форме заготовки в процессе вальцовки в двух переходах и вывести графики зависимости силы от времени в овальном калибре (рис. 2, а) и в круглом калибре (рис. 2, б).

Максимальная сила при вальцовке в овальном калибре на верхнем валке равна 80,5 кН, на нижнем валке равна 80,3 кН. Значения сил на валках практически совпадают. В начале операции вальцовки, когда сектора начинают соприкасаться с поковкой, происходит рост силы с большой интенсивностью, соответственно растут и напряжения. Максимальная нагрузка наблюдается в момент, когда секторы находятся напротив друг друга в положениях крайнем нижнем (верхний валок) и крайнем верхнем (нижний валок), затем сила деформирования уменьшается. Это объясняется тем, что в описанном взаимном положении секторов-штампов площадь пятна контакта имеет максимальную величину, во всех остальных положениях площадь пятна контакта меньше. График зависимости силы от времени вальцовки в круглом калибре (рис. 2, б) показывает, что вальцовка в круглом калибре проходит с тем же уровнем силовых параметров, что и в овальном калибре (на верхнем валке сила равна 82,6 кН; на нижнем валке сила равна 83,2 кН).

Для полного анализа напряжённого состояния металла заготовки были определены компоненты тензора напряжений при вальцовке в овальном (таблица 1) и круглом (таблица 2) калибрах. В

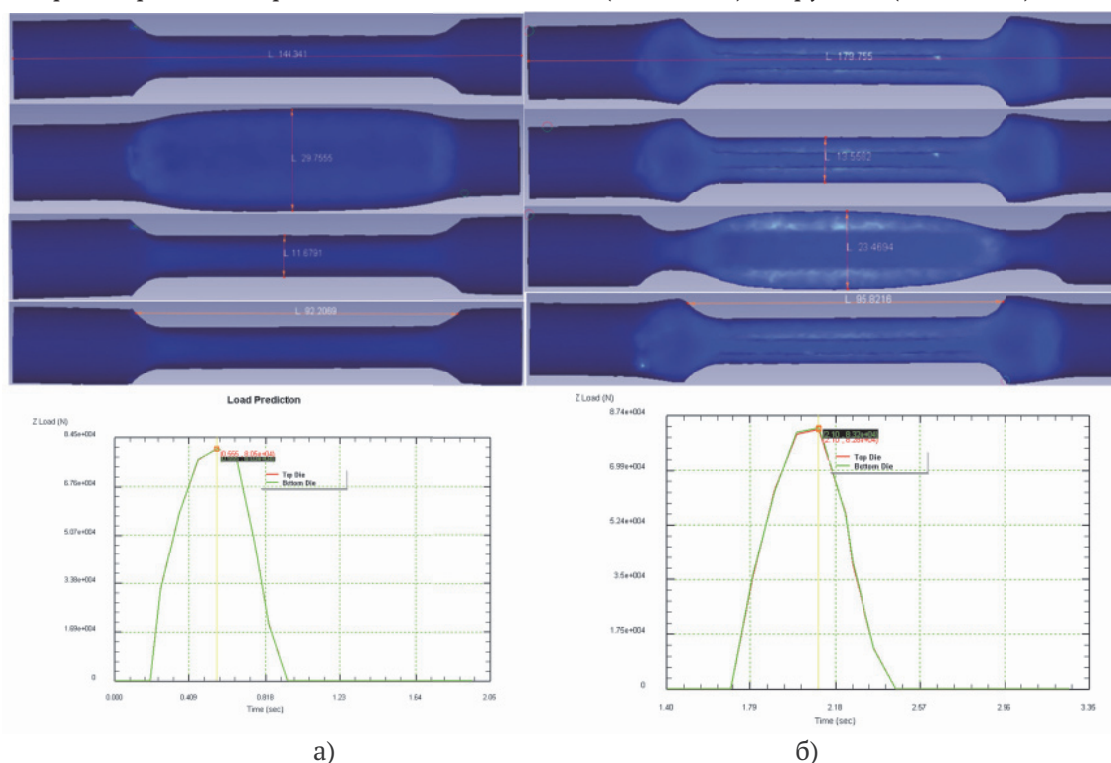


Рис. 2. Форма, размеры и силовые параметры при профилировании заготовок вальцовкой: а – в овальном калибре; б – в круглом калибре

Таблица 1. Значения нормальных и касательных напряжений в поковке на разных этапах вальцовки в овальном калибре

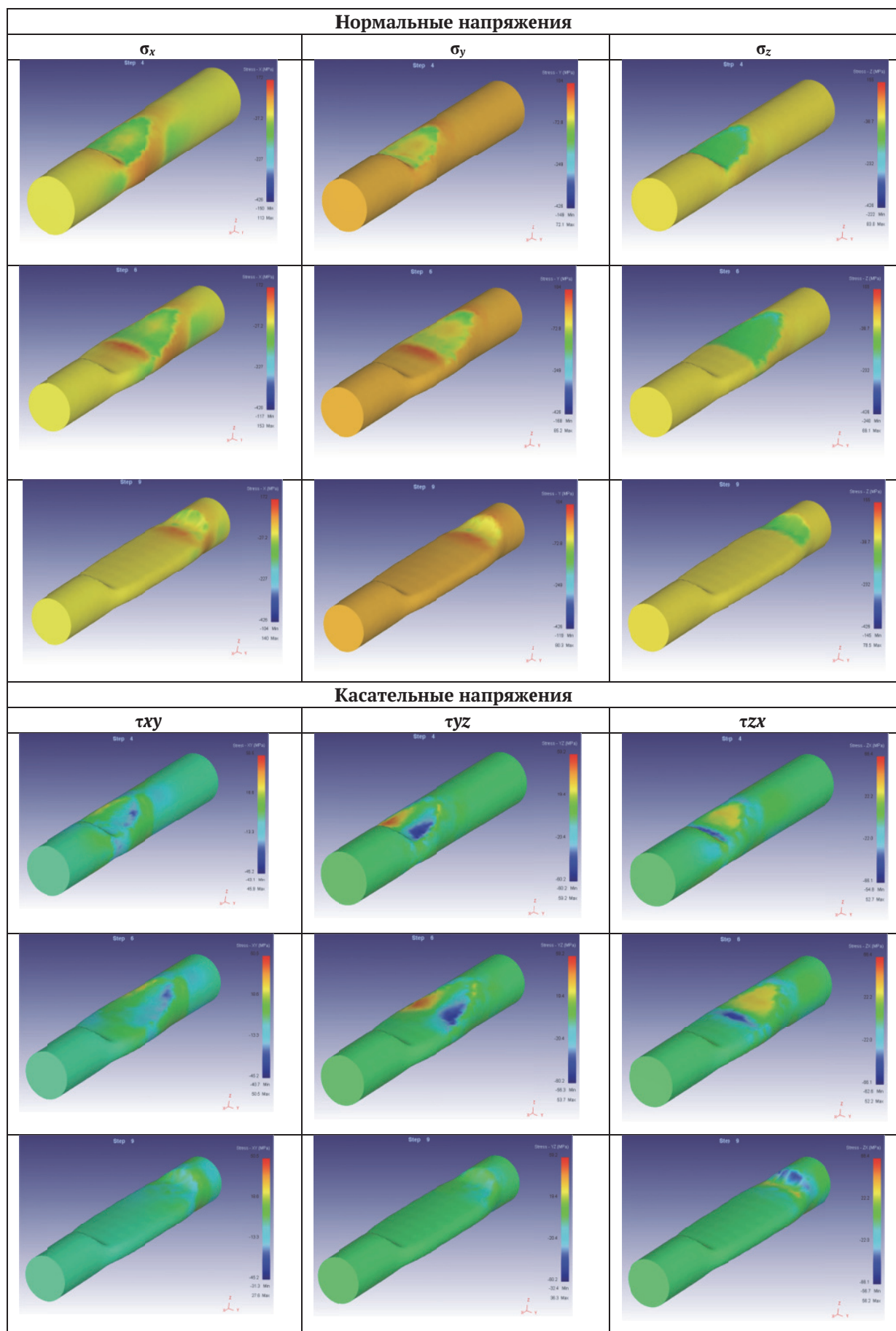
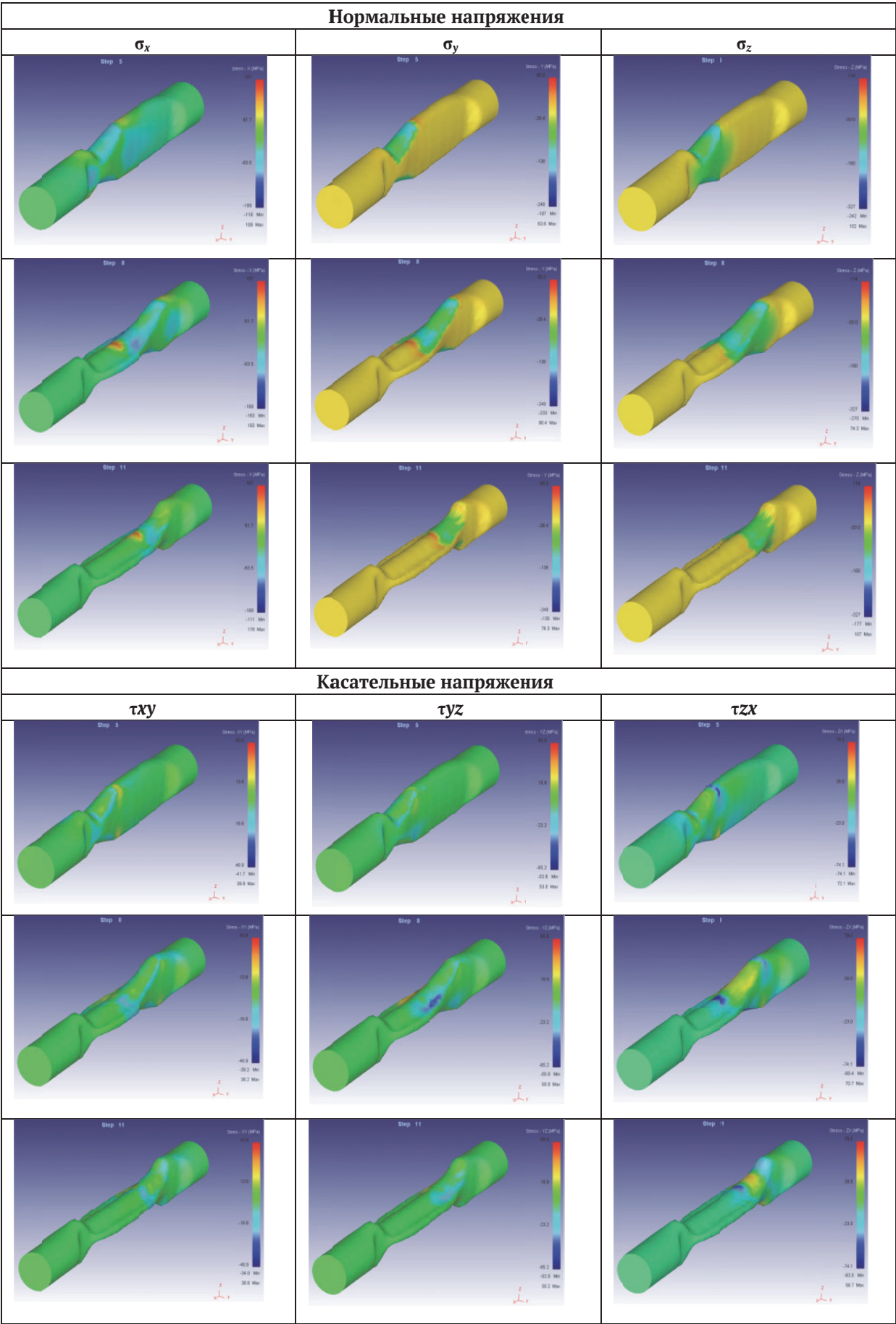


Таблица 2. Значения нормальных и касательных напряжений в поковке на разных этапах вальцовки в круглом калибре



зоне касания инструментов вдоль длины заготовки преобладают сжимающие нормальные напряжения. В направлении оси X (см. таблицу 1) преобладают растягивающие нормальные напряжения, так как в данном направлении секторы протягивают поковку, причем максимальные значения не превышают 153 МПа. Распределение нормальных напряжений по объему непрерывно меняется на протяжении всего цикла перемещения пятна контакта секторов с заготовкой. В направлении, совпадающем с направлением осей валков Y, преобладают сжимающие напряжения. В направлении Z также преобладают сжимающие нормальные напряжения с большими значениями, но не превышающими 240 МПа. В данном направлении происходит сжатие заготовки. Уровень касательных напряжений по стадиям вальцовки в овальном калибре также представлен в таблице 1.

Анализируя значения напряжений в поковке на разных этапах вальцовки в круглом калибре (таблица 2) вдоль осей координат установлено, что максимальное растягивающее напряжение наблюдается в направлении оси X, совпадающей с осью заготовки, и равно 193 МПа.

По оси Y как при вальцовке в овальном ручье преобладают сжимающие напряжения, которые меньше по сравнению с направлением, перпендикулярным оси поковки, т. е. оси Z, где их значения не превышают 270 МПа. Анализ касательных напряжений показал, что значимые изменения происходят только в моменты начала и окончания контакта секторов-штампов с поковкой, поскольку значительных колебаний величины этих напряжений не обнаружено.

Рис. 3 иллюстрирует изменение деформированного состояния профилируемой заготовки, оцениваемое интенсивностью деформаций, а рис. 4 – изменение температурных полей на переходах вальцовки в овальном (а) и круглом (б) калибрах.

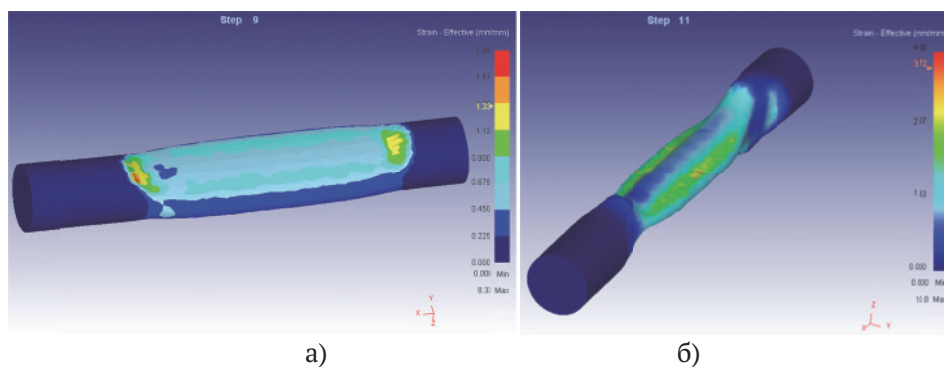


Рис. 3. Интенсивность деформации:
а – овальный и б – круглый калибры

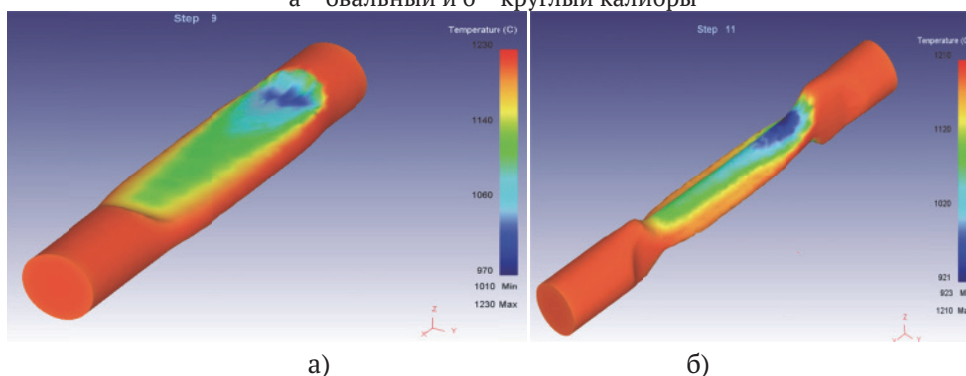


Рис. 4. Температурные поля:
а – овальный калибр; б – круглый калибр

Максимальная интенсивность деформации при вальцовке в овальном и круглом калибрах достигается в начальный и конечный моменты контакта инструмента с заготовкой. Наибольшие значения интенсивности составили 1,33 (овальный калибр) и 3,72 (круглый калибр).

Остаточная температура заготовки 1080 °C после вальцовки в овальном и круглом калибрах не выходит за пределы нижней границы допустимого интервала горячей штамповки (940 °C) и не требует дополнительного нагрева под окончательную штамповку.

Компьютерное моделирование штамповки на КГШП позволило проанализировать течение металла при заполнении окончательного ручья штампа (рис. 5 а). В ходе исследования не выявлено дефектов, связанных с неполным заполнением ручья, что подтверждает достаточный объем исходной заготовки, и также это свидетельствует о корректности формы и размеров профилированной заготовки, полученной вальцовкой. Анализ графика изменения силы по ходу ползуна прессы при

штамповке профилированной заготовки в окончательном ручье, показал, что максимальное значение силы при горячей штамповке составляет 3590 кН (рис. 5 б).

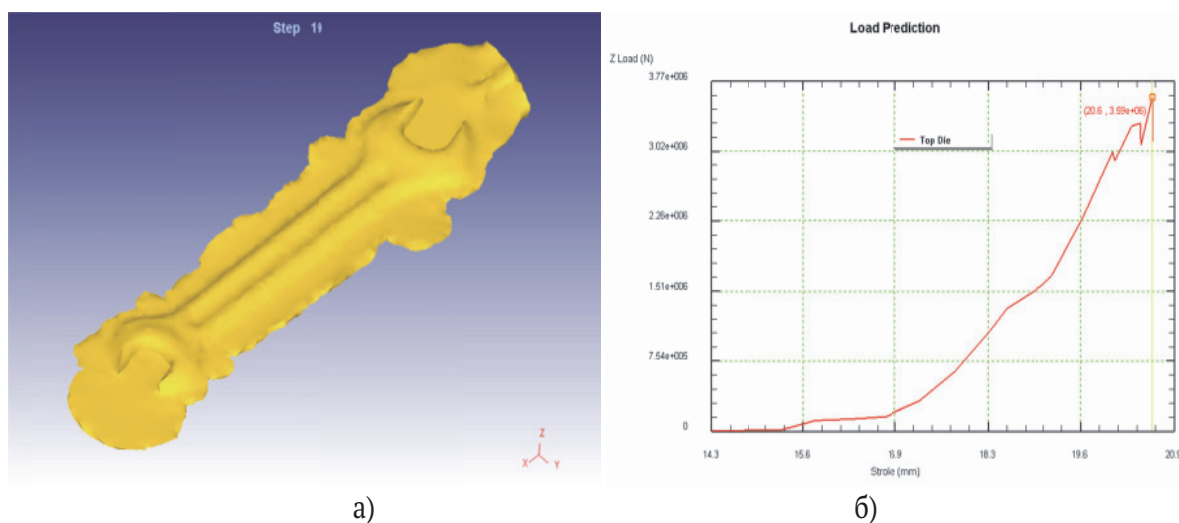


Рис. 5. Поковка гаечного ключа (а) и график изменения силы деформирования (б) при горячей штамповке профилированной заготовки в окончательном ручье штампа КГШП

По результатам технологических расчетов и компьютерного моделирования исследованы три варианта профилированных заготовок, размеры которых приведены в таблице 3.

Таблица 3. Размеры профилированных заготовок по вариантам технологии вальцовки

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
	Расчетная профилированная заготовка	Профилированная заготовка, полученная в результате моделирования в секторах, размеры которых вычислены аналитическими расчетами	Профилированная заготовка, полученная в результате моделирования в секторах со скорректированными ручьями
Длина поковки, мм	177,4	183,86	179,75
Ширина вальцованной части, мм	Круг Ø16мм	17,2	23,47
Высота вальцованной части, мм		15,9	13,56
Длина вальцованной части, мм	100	89,85	95,8
Диаметр утолщений, мм	22	22	22

Первый и второй варианты профилированных поковок получены из исходной заготовки, имеющей длину 136 мм и диаметр 22 мм. Третий вариант - деформирование из исходной заготовки такого же диаметра, но длиной 122 мм.

ВЫВОД

Размеры всех профилированных заготовок таковы, что объема металла хватает для полного заполнения ручья штампа КГШП, однако третий вариант обеспечивает наименьшее количество отходов в виде облоя в зоне рукояти гаечного ключа, что повышает КИМ на 6,7% (66,9% против 59,2% по размерам калибров, полученных аналитически).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2784307 РФ МПК В21К 5/16 (2006.01) В21К 5/16 (2022.05) Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием / Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, Д.С. Гусев, М.В. Шарыкин, Н.Г. Хохлова. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 23.11.2022. Бюл. № 33.
2. Патент № 2781825 РФ МПК В21К 5/16 (2006.01) В21К 5/16 (2022.05) Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием / Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, Д.С. Гусев, С.А. Рогулин, Н.Г. Хохлова. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 18.10.2022. Бюл. № 29.
3. Рогулин, С.А. Исследование технологических параметров операций горячего деформирования поковки типа «Гаечный ключ» / С.А. Рогулин, Е.Н. Сосенушкин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 5 – С. 376-383. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-376-377.
4. ГОСТ 2839-80. Ключи гаечные с открытым зевом двусторонние. Конструкция и размеры. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 22 с.
5. ГОСТ 4543-2016 Металлопродукция из конструкционной и легированной стали. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 50 с.
6. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 2е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И.Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.
7. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 10 с.
8. Карпайтис, Е.П. Проектирование инструментов для горячей вальцовки заготовок / Е.П. Карпайтис, П.И. Золотухин, И.М. Володин // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. – Т.2. – №1 (15). – С. 76-79.
9. Патент № 2828337 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа / Е.Н. Сосенушкин, С.А. Рогулин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Пономарева. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 09.10.2024. Бюл. № 28.
10. Патент № 2827967 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа / С.А. Рогулин, Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Пономарева, Д.С. Гусев. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 14.10.2024. Бюл. № 28.
11. Патент № 2828456 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа / Е.Н. Сосенушкин, С.А. Рогулин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Пономарева. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 14.10.2024. Бюл. № 29.
12. Патент № 2827189 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов / Е.Н. Сосенушкин, С.А. Рогулин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская, В.А. Кадымов, Шарыкин М.В. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 23.09.2024. Бюл. № 27.
13. Патент № 2827191 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов / С.А. Рогулин, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 23.09.2024. Бюл. № 27.
14. Патент № 2828455 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов / Е.Н. Сосенушкин, Р.С. Рогулин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская, В.А. Кадымов, Шарыкин М.В. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Опубл. 14.10.2024. Бюл. № 29.
15. Золотухин, П.И. Моделирование горячей вальцовки заготовок в овальных и круглых калибрах / П.И. Золотухин, И.М. Володин, Е.П. Карпайтис // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. № 10. – С. 115-121.

RATIONALIZATION OF ROLLING BY MODELING PARAMETERS OF A BLANK FOR STAMPING OF A FORGING “WRENCH” PART AS A WAY OF RESOURCE SAVING

© 2025 S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya

Moscow State Technological University «STANKIN», Moscow, Russia

The results of the study of the rolling operation of forging the «wrench» part in the sector tools of forging rollers and the selection of the necessary shapes and sizes of semi-finished products to reduce technological waste in the form of flash. With the help of computer experiments in the DEFORM-3D software package, rational parameters of the streams of the die sectors, as well as the dimensions of the initial blank for rolling were found.

Keywords: hot deformation, modeling, profiled workpiece, rolling, sector – stamp.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-147-154

EDN: VXZLTQ

REFERENCES

1. Patent № 2784307 RF MPK B21K 5/16 (2006.01) B21K 5/16 (2022.05) Sposob izgotovleniya gaechnyh klyuchey plasticheskim deformirovaniem / E.N. Sosenushkin, A.E. Sosenushkin, V.A. Kadymov, E.A. Yanovskaya, D.S. Gusev, M.V. Sharykin, N.G. Hohlova. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 23.11.2022. Byul. № 33.
2. Patent № 2781825 RF MPK B21K 5/16 (2006.01) B21K 5/16 (2022.05) Sposob izgotovleniya gaechnyh klyuchey plasticheskim deformirovaniem / E.N. Sosenushkin, A.E. Sosenushkin, V.A. Kadymov, E.A. Yanovskaya, D.S. Gusev, S.A. Rogulin, N.G. Hohlova. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 18.10.2022. Byul. № 29.
3. Rogulin, S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh parametrov operacij goryachego deformirovaniya pokovki tipa «Gaechnyj klyuch» / S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – № 5 – S. 376-383. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-376-377
4. GOST 2839-80. Klyuchi gaechnye s otkrytym zevom dvustoronnie. Konstrukciya i razmery. – M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam, 1980. – 22 s.
5. GOST 4543-2016 Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj i legirovannoj stali. Tekhnicheskie usloviya. – M.: Standartinform, 2019. – 50 s.
6. Kovka i shtampovka: spravochnik. V 4 t. T. 2. Goryachaya ob»emnaya shtampovka. 2e izd., pererab. i dop. / Pod obshch. red. E.I. Semenova. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 720 s.
7. GOST 2590-2006 Prokat sortovoj stal'noj goryachekatanyj kruglyj. Sortiment. – M.: Izd-vo standartov, 2012. – 10 c.
8. Karpajtis, E.P. Proektirovanie instrumentov dlya goryachej val'covki zagotovok / E.P. Karpajtis, P.I. Zolotuhin, I.M. Volodin // Izvestiya MGU «MAMI». 2015. – T.2. – № 1 (15). – S. 76-79.
9. Patent № 2828337 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnyh val'cov konsol'nogo tipa / E.N. Sosenushkin, S.A. Rogulin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.S. Ponomareva. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 09.10.2024. Byul. № 28.
10. Patent № 2827967 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnyh val'cov konsol'nogo tipa/ S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.S. Ponomareva, D.S. Gusev. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 28.
11. Patent № 2828456 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnyh val'cov konsol'nogo tipa/ E.N. Sosenushkin, S.A. Rogulin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.S. Ponomareva. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 29.
12. Patent № 2827189 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnyh val'cov/ E.N. Sosenushkin, S.A. Rogulin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, V.A. Kadymov, Sharykin M.V. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 23.09.2024. Byul. № 27.
13. Patent № 2827191 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnyh val'cov/ S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.E. Sosenushkin. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 23.09.2024. Byul. № 27.
14. Patent № 2828455 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnyh val'cov / E.N. Sosenushkin, R.S. Rogulin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, V.A. Kadymov, Sharykin M.V. FGBOU VO «MGU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 29.
15. Zolotuhin, P.I. Modelirovanie goryachej val'covki zagotovok v oval'nyh i kruglyh kalibrah / P.I. Zolotuhin, I.M. Volodin, E.P. Karpajtis // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2012. № 10. – S. 115-121.

Sergey Rogulin, Graduate Student of the SPD Department. E-mail: serzh.rogulin2013@yandex.ru

Evgeniy Sosenushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Composite Materials Department.

E-mail: sen@stankin.ru

Elena Yanovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics.

E-mail: elena_yanovskaya@bc.ru