

УДК 621.7.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ШТАМПОВКИ ИЗДЕЛИЯ «ТРОЙНИК» ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT20

© 2025 К.А. Николенко, А.Г. Шляпугин, А.В. Казаков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 31.03.2025

Представлены результаты исследований технологических операций и совершенствования технологического процесса изготовления детали «Тройник» из титанового сплава BT20 с использованием программного комплекса QFORM-3D и последующей верификацией результатов. Определены направления для проведения дальнейших исследований, а также предложен состав методики вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: заготовка, оснастка, конечно-элементное моделирование, высокотемпературная листовая штамповка, QFORM, BT20, тройник.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-5-11

EDN: DJXBEV

Современный уровень решения технологических задач требует использования наукоемкого программного обеспечения [1-5]. При этом по аналогии с физическими экспериментами использование современных сложных программ требует применения определенных правил обеспечивающих адекватность получаемых результатов моделирования и их повторяемость [6]. Разработчики программ не раскрывают детали использования применяемого математического аппарата, фактические рекомендации по использованию программного обеспечения требуют сравнения результатов моделирования и физического эксперимента для конкретных случаев применения программного обеспечения. На практике для большинства производств, необходимость проведения дополнительных исследований применительно к конкретной задаче увеличивает затраты и время внедрения технологических процессов.

Использование конечно-элементного моделирования, как любого теоретического исследования, требует применения допущений, как на этапе создания программного обеспечения, так и в процессе его использования. При задании параметров для программы и последующего сравнения результатов с экспериментальными данными отлаживается инструментарий для моделирования, который в дальнейшем может использоваться для решения аналогичных задач на конкретном предприятии.

Сложившаяся мировая конъюнктура ограничивает круг разработчиков наукоемкого программного обеспечения (CAE) отечественными разработками. В данной статье рассмотрено применение нового модуля листовой штамповки программы QFORM-3D отечественного разработчика ООО «Кванторформ».

Данная работа посвящена совершенствованию технологии горячей листовой штамповки детали «Тройник» (DIN 11850) из титанового сплава BT20 на основании результатов моделирования в программном комплексе QFORM V10 и эксперимента с применением гидравлического оборудования (гидравлический пресс PVE-1605).

Исследование проводилось в шесть этапов: проектирование геометрии штамповой оснастки; определение технологических параметров высокотемпературной штамповки листа из титанового сплава; моделирование процесса штамповки в программном комплексе QFORM V10; экспериментальная проверка результатов; корректировка параметров процесса с использованием повторного компьютерного моделирования и заключительная экспериментальная проверка результатов.

Николенко Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: nik201206@yandex.ru

Шляпугин Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент.

Казаков Антон Вячеславович, аспирант.

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

Тройник изготавливается из двух частей (симметричных половин) соединяемых сваркой, половины штампуются в три перехода. Выполнено моделирование многопереходной штамповки в трёх вариантах с двумя формами заготовок – прямоугольной и с радиусными вырезами (рис. 1). Исходя из Т-образной формы детали, было сделано предположение о форме заготовки с двумя вырезами радиусом 34,5 мм. Глубина формовки по переходам: 21,0 мм – первый переход; 36,0 – второй переход, 46,0 – третий переход. Штамповка осуществляется в штампах аналогичной конструкции, состоящих из пуансона, матрицы и прижима, на рисунке 2 показана геометрическая модель оснастки первого перехода.

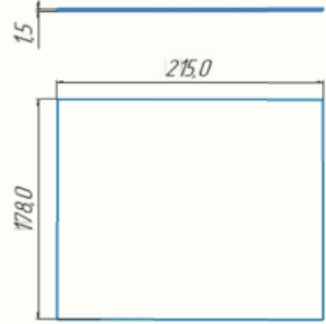
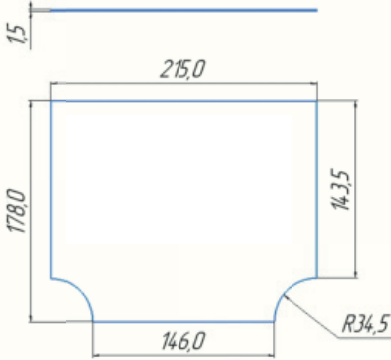
Температурный режим	Форма заготовки
Первый вариант	
Температура заготовки: 800°C Температура оснастки: 700°C Температура окружающей среды: 450°C	
Второй и третий варианты	
Второй вариант	
Температура заготовки: 800°C Температура оснастки: 700°C Температура окружающей среды: 450°C	
Третий вариант	
Температура заготовки: 800°C Температура оснастки: 700°C Температура окружающей среды: 700°C	

Рисунок 1 – Три варианта технологических параметров штамповки детали «Тройник»

После штамповки перед сваркой предусмотрена подрезка фланца и подготовка кромок под последующую сварку половин. Обрезка по отрезкам (торцевание тройника) осуществляется после сварки половин.

В таблице 1 представлены основные параметры процесса, заданные в программном комплексе QFORM-3D.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ

С использованием специального модуля расчёта утонения заготовки в программном комплексе QFORM-3D, были получены поля распределений толщины заготовки в каждом переходе (рис.3). Согласно полученным данным, у прямоугольной заготовки происходит интенсивное утонение в опасном сечении. Было сделано предположение о том, что это является следствием затруднённого течения металла в области углов заготовки, что подтвердили картины распределения векторов скоростей течения металла (рис. 4). У заготовки сложной формы скорость затягивания металла существенно выше (в 2 раза), чем у прямоугольной.

Также, исходя из рисунков 3-4, можно сделать предположение о вероятном разрушении заготовок в области интенсивного утонения, что подтвердил анализ напряжённо-деформированного состояния при помощи полей распределения напряжений и деформаций (рис. 5).

Результат верификации результатов моделирования представлен на рисунке 6, где представлено поле распределения значений критерия Колмогорова и деталь, отштампованная на реальном оборудовании.

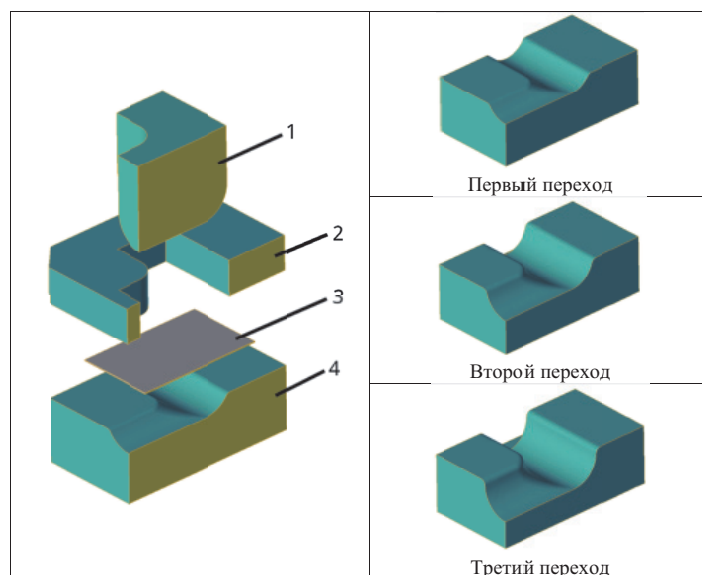


Рисунок 2 — Конструкция штампа первого перехода (разрез по плоскости симметрии):
1- пуансон; 2 — прижим; 3 — заготовка; 4 - матрица

Таблица 1 – Основные параметры процесса

Параметр	Значение
Материал заготовки	BT20 – параметры из библиотеки QFORM-3D
Температура заготовки	800°C
Материал оснастки	5XNM
Температура оснастки	700°C
Температура окружающей среды	450°C/700°C
Привод прижима	Универсальный в направлении -OZ с усилием 5 тонн
Привод пуансона	Универсальный в направлении -OZ со скоростью 1 мм/с
Привод матрицы	Неподвижный в направлении +OZ
Трение	Леванов, фактор трения 0,5
Критерий разрушения	Критерий Колмогорова – параметры из библиотеки QFORM
Условие остановки	Расстояние между инструментами 1,5мм
Параметры прижима	Зазор 1,5 мм, без усилия

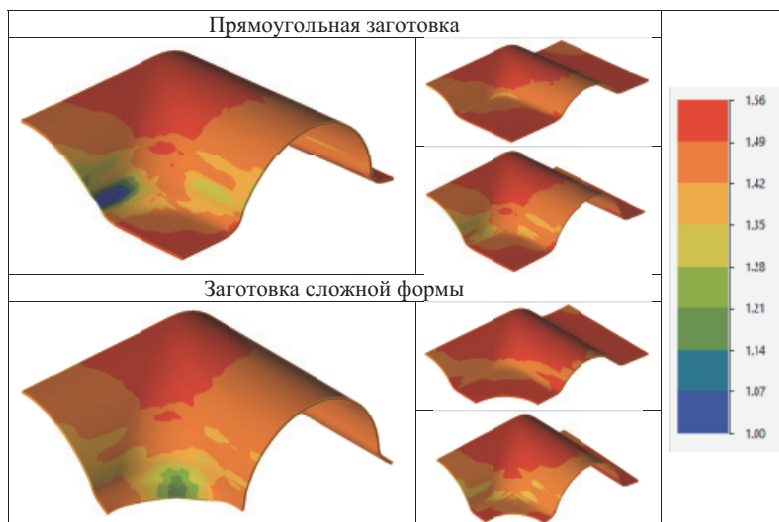


Рисунок 3 – Поля толщины заготовки, мм

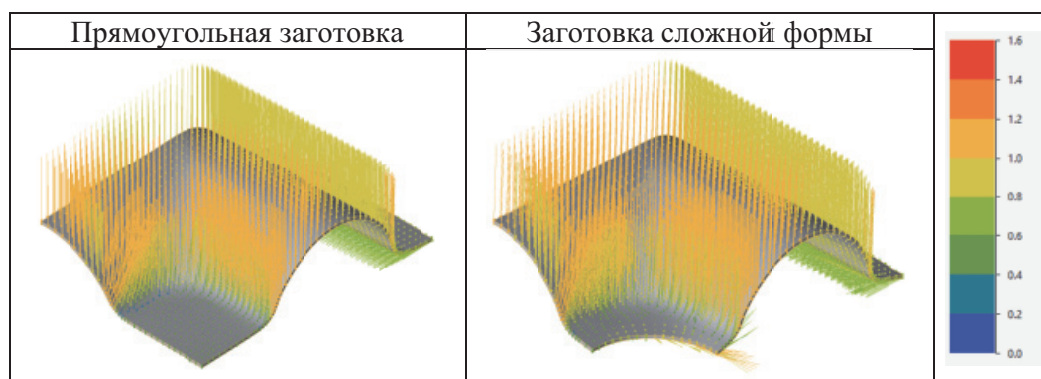


Рисунок 4 – Векторы направления скорости течения металла (третий переход)

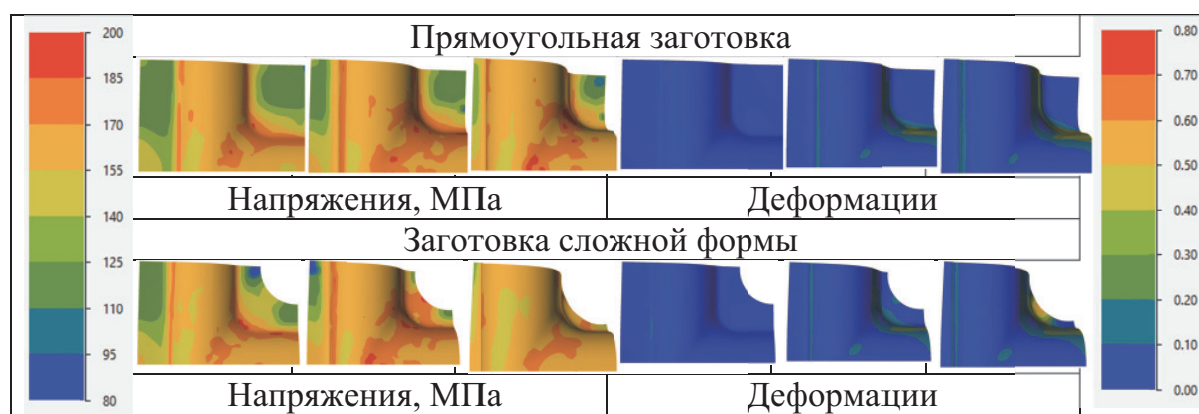


Рисунок 5 – Поля распределения интенсивности напряжений и пластической деформации по переходам штамповки

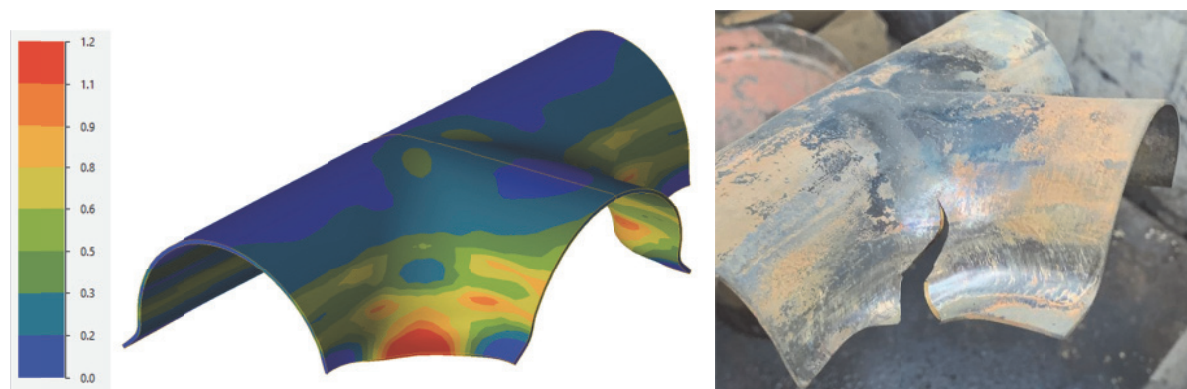


Рисунок 6 – Поле распределения значений критерия Колмогорова (слева) и результат штамповки на реальном оборудовании (справа)

Таким образом, необходимо скорректировать технологические параметры, а именно:

- геометрию заготовки – использовать заготовку с вырезами радиусом 34,5 мм;
- температурный режим штамповки – проконтролировать межоперационный подогрев заготовки, во избежание охлаждения в опасном сечении и повысить температуру окружающей среды до 700°C.
- параметры прижима – обеспечить гарантированный зазор между прижимом и матрицей равный толщине заготовки.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С СКОРРЕКТИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Результаты моделирования многопереходной штамповки в виде эпюр распределения температур с учетом рекомендованных параметров представлены на рисунке 7.

Как видно из рисунков большая потеря тепла происходит на торцах полуфабриката. На участках с большими значениями интенсивностей напряжений заготовка остывает медленнее.

Распределение полей мест вероятного разрушения представлено на рисунке 8. Исходя из характера распределения, можно сделать вывод о разрушении заготовки в области радиусного скругления пуансона, что уже было экспериментально подтверждено (рис. 6).

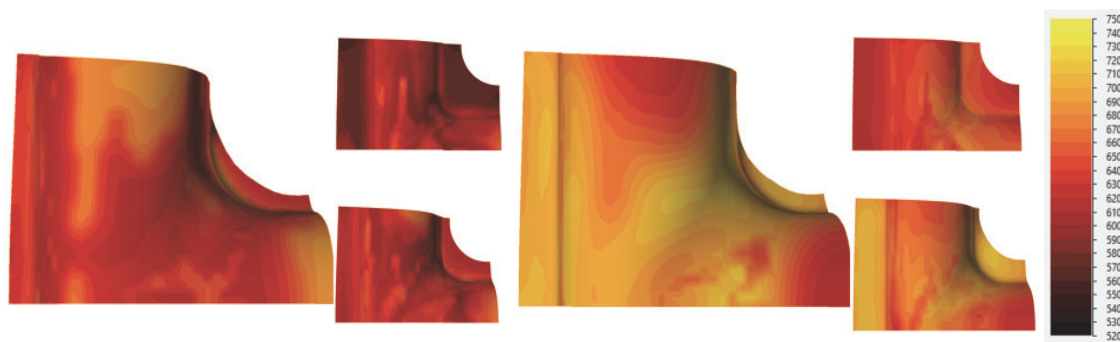


Рисунок 7 – Поля распределения значений температур, °C

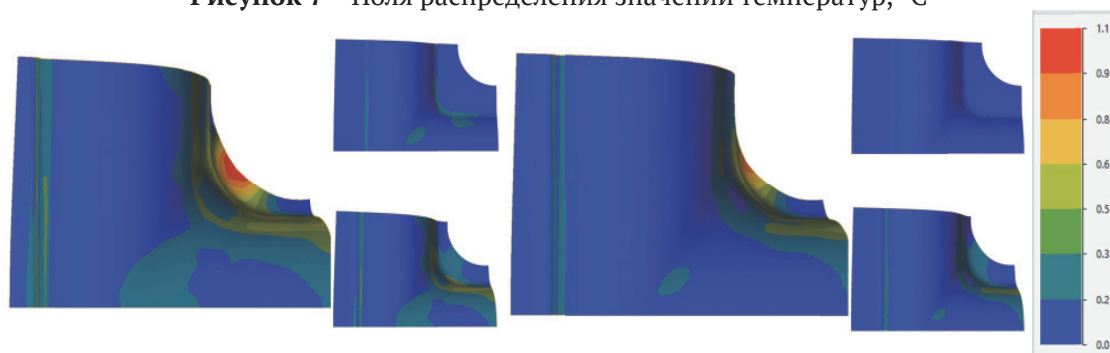


Рисунок 8 – Поля распределения значений критерия Колмогорова

Из рисунков видно, что при соблюдении температурного режима максимальные значения критерия разрушения снижаются и, хотя всё ещё являются близкими к предельным, уже не превышают значения в 1,0.

На основании полученных данных, было произведено дополнительное моделирование и рассчитан критерий разрушения. Зависимость максимальных значений критерия от температуры окружающей среды представлены на графике (рис. 9).

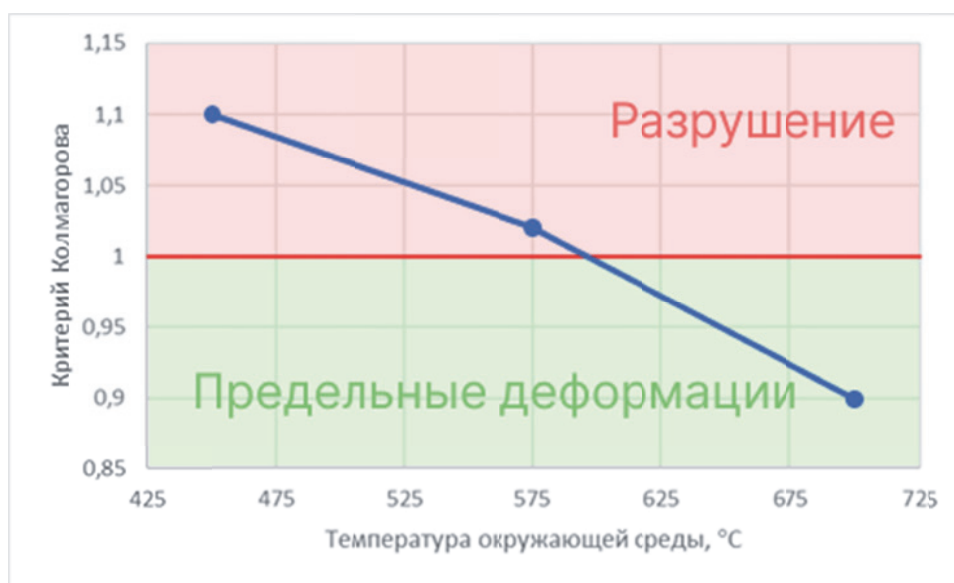


Рисунок 9 – График зависимости максимальных значений критерия разрушения от температуры

Совершенствование технологии с учетом результатов моделирования позволило получить изделие требуемого качества без разрушения и интенсивного утонения. На рисунке 9 представлен результат штамповки тройника с корректировками, полученными на моделировании.

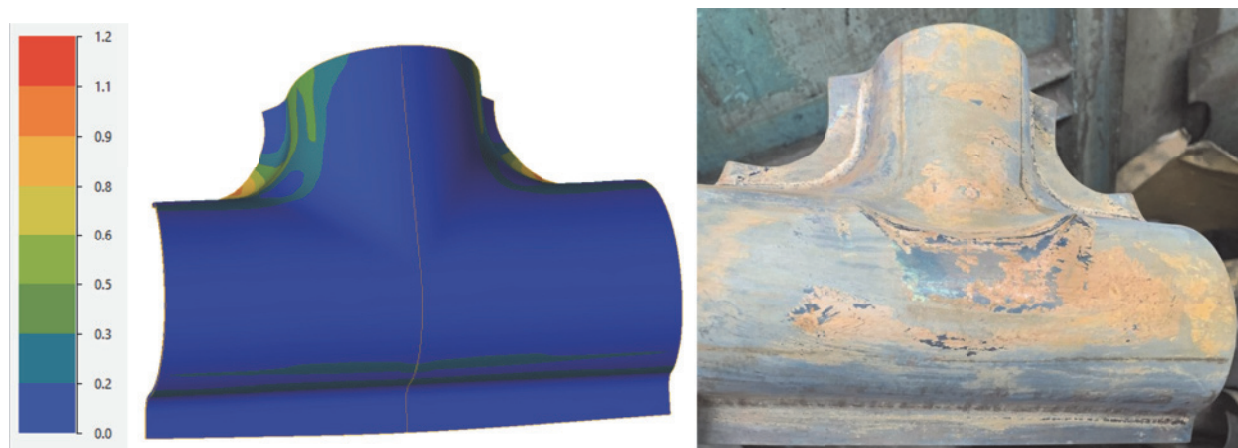


Рисунок 10 – Штамповка детали без разрушения

ВЫВОД

С использованием перечисленных параметров процесса в программе QFORM-3D выполнено моделирование процесса горячей листовой штамповки детали «Тройник» из титанового сплава BT20. Для задания исходных данных использовался целый ряд настроек в соответствии с рекомендациями разработчика. Полученный в результате численного моделирования результат показал качественно похожую картину сравнимую с получаемыми на практике данными.

На основании данных моделирований можно сделать вывод, что для изготовления детали «Тройник», без дефектов, необходимо соблюдать требования технологического процесса – размеры заготовки, расстояние между матрицей и прижимом, выполнять штамповку при температуре заготовки не ниже 700°C. В противном случае возможно разрушение изделия на третьем переходе в области переднего торца тройника в месте радиусного закругления матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57700.2—2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения.
2. Лавриненко В. Ю. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки / В. Ю. Лавриненко // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — С. 279-289.
3. Лавриненко В. Ю. Компьютерное моделирование процессов холодной объемной штамповки / В. Ю. Лавриненко // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — С. 267-278.
4. Bending process simulation of a flat workpiece with various cross-sectional mechanical properties with PAM-STAMP 2G. F Grechnikov, Y Gorshkov, YA Erisov - Key Engineering Materials, 2016.
5. Вовченко, А.В. Особенности эффективных схем штамповки поковок сложной формы в открытом штампе, разработанных с использованием численного моделирования / А.В. Вовченко, К.А. Костенко, О.И. Катрич // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 1. С. 38–49.
6. ГОСТ Р 57700.10-2018 Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF SHEET HIGH-TEMPERATURE STAMPING OF THE PRODUCT «TEE» MADE OF TITANIUM ALLOY VT20

© 2025 K.A. Nikolenko, A.G. Shlyapugin, A.V. Kazakov

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

The results of research on technological operations and improvement of the manufacturing process of the “Tee” part made of VT20 titanium alloy using the QFORM-3D software package and subsequent verification of the results are presented. The directions for further research are determined, and the composition of the computational experiment methodology is proposed.

Keyword: billet, tooling, finite element modeling, high-temperature sheet stamping, QFORM, VT20, tee.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-5-11

EDN: DJXBEV

REFERENCES

1. GOST R 57700.2—2017 Chislennoe modelirovanie dlya razrabotki i sdachi v ekspluatatsiyu vysokotekhnologichnyh promyshlennykh izdelij. Sertifikatsiya programmnogo obespecheniya.
2. *Lavrinenko V. Yu.* Komp'yuternoe modelirovanie processov listovoj shtampovki / V. Yu. Lavrinenko // Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii : materialy 6-j mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii. Ural'skaya nauchno-pedagogicheskaya shkola imeni professora A. F. Golovina», [g. Ekaterinburg, 29 oktyabrya - 1 noyabrya 2012 g.]. — Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2013. — S. 279-289.
3. *Lavrinenko V. Yu.* Komp'yuternoe modelirovanie processov holodnoj ob'emnoj shtampovki / V. Yu. Lavrinenko // Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii : materialy 6-j mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii. Ural'skaya nauchno-pedagogicheskaya shkola imeni professora A. F. Golovina», [g. Ekaterinburg, 29 oktyabrya - 1 noyabrya 2012 g.]. — Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2013. — S. 267-278.
4. Bending process simulation of a flat workpiece with various cross-sectional mechanical properties with PAM-STAMP 2G. F Grechnikov, Y Gorshkov, YA Erisov - Key Engineering Materials, 2016.
5. *Vovchenko, A.V.* Osobennosti effektivnykh skhem shtampovki pokovok slozhnoj formy v otkrytom shtampe, razrabotannykh s ispol'zovaniem chislennogo modelirovaniya / A.V. Vovchenko, K.A. Kostenko, O.I. Katrich // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. T. 18. № 1. s. 38–49.
6. GOST R 57700.10-2018 Chislennoe modelirovanie fizicheskikh processov. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya. Verifikatsiya i validatsiya chislennykh modelej slozhnykh elementov konstrukcij v uprugoy oblasti.