

ШТАМПОВКА ПОКОВОК С БОКОВЫМИ ОТРОСТКАМИ ТИПА ТРОЙНИКОВ В РАЗЪЕМНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

В. В. Грязнов, В. А. Коновалов,
Д. А. Кормаков,
И. В. Маркечко, Е. Н. Меркушев

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье рассматриваются варианты анализа конструкторско-технологических решений горячей объемной штамповки тройников в разъемных штампах на кривошипном горячештамповочном прессе двойного действия. Методика анализа основана на оценке параметров формоизменения при допустимых изменениях формы и размеров гравюры формообразующего инструмента и размеров заготовок. Используются современные методы исследований, сопровождаемые циклом проектирования технологии от задания начальных условий до создания 3D-модели штампованных поковок и изготовления инструмента. Разработанный алгоритм проектирования технологии позволяет добиться упрощения и ускорения процесса подготовки производства поковок. В заключение представлены факторы, определяющие возможности повышения качества штампуемых изделий, и предложены направления возможного совершенствования технологии штамповки поковок деталей с отрезками типа тройников.

Ключевые слова: горячая штамповка, пресс двойного действия, моделирование, формоизменение, тройник, поковка с отрезком, разъемные матрицы.

Для цитирования: Грязнов В. В., Коновалов В. А., Кормаков Д. А., Маркечко И. В., Меркушев Е. Н. Штамповка поковок с боковыми отрезками типа тройников в разъемном инструменте // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 18–25. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-18-25. EDN: FBDTUN.



© Грязнов В. В., Коновалов В. А., Кормаков Д. А.,
Маркечко И. В., Меркушев Е. Н., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STAMPING OF FORGINGS WITH SIDE OUTLETS OF TEE-TYPE IN A SPLIT TOOL

V. V. Gryaznov, V. A. Kononov,
D. A. Kormakov,
I. V. Markechko, E. N. Merkushev

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article considers the options for analyzing design and technological solutions for hot volume stamping of tees in split dies on a double-action crank hot stamping press. The analysis technique is based on assessing the parameters of shaping with acceptable changes in the shape and size of the shaping tool engraving and the dimensions of the blanks. Modern research methods are used, accompanied by a technology design cycle from setting the initial conditions to creating a 3D model of stamped forgings and manufacturing the tool. The developed algorithm for designing the technology allows for simplifying and accelerating the process of preparing for the production of forgings. In conclusion, the factors that determine the possibilities of improving the quality of stamped products are presented, and directions for possible improvement of the technology for stamping forgings of parts with tee-type processes are proposed.

Keywords: hot stamping, double-action press, modeling, shaping, tee, forging with a process, split dies.



В конструкциях трубопроводов различных агрегатов, устройств и машин, как правило, не обходятся без применения деталей, обеспечивающих разветвление этих трубопроводов. К таким деталям относятся различного рода тройники, позволяющие изменять направление потоков жидкости либо газа в трубопроводе. Известно несколько технологий получения штампованных заготовок для тройников. Наиболее часто применяемым вариантом для деталей из стали является горячая штамповка из штучной заготовки в инструменте объемного деформирования с одним разъемом. Если тройник сравнительно небольших габаритов, то применяют многоступенчатый метод (одна заготовка на несколько поковок).

При открытой схеме деформирования процесс сопровождается образованием технологического отхода — облоя. Причем чем меньше масса изделия, тем больше в заготовке доля такого отхода.

Безоблойная штамповка приемлема в случаях изготовления больших партий поковок тройников, когда экономия металла на отсутствии облоя оправдывает усложняющуюся в таких случаях конструкцию инструмента.

Основное требование — обеспечение приближения наружных контуров и размеров поковки к готовой детали может быть обеспечено увеличением числа поверхностей разреза штампа (не менее двух) либо применением механизмов замыкания разъемных частей штампового блока. Таких конструктивных решений для штампов, устанавливаемых на прессы одностороннего действия, разработано немало, однако однозначно надежным не одно из них признать нельзя. Значительные преимущества и устранение части названных проблем при реализации технологии штамповки в разъемном инструменте даёт использование кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) двойного действия.

Выбор технологических решений при проектировании инструмента для штамповки на этих прессах является также сложной задачей. Определяющие факторы: типоразмеры поковок, свойства штампуемого материала и инструмента, условия нагрева, смазка гравюры и прочее. В представленной работе предложены материалы экспериментальных исследований и моделирования процессов горячей штамповки тройников в разъемных штампах на КГШП двойного действия. Работа посвящена поиску конструкторско-технологических решений, снижающих риск или исключающих характерные дефекты штампованных тройников (зажимы, незаполненные элементы формы гравюры и другие). Целью работы является выявление факторов, определяющих возможности повышения качества штампуемых изделий.

1. Анализ публикаций по рассматриваемой теме

Чтобы понимать предстоящие проблемы исследования и определиться с конкретными его зада-

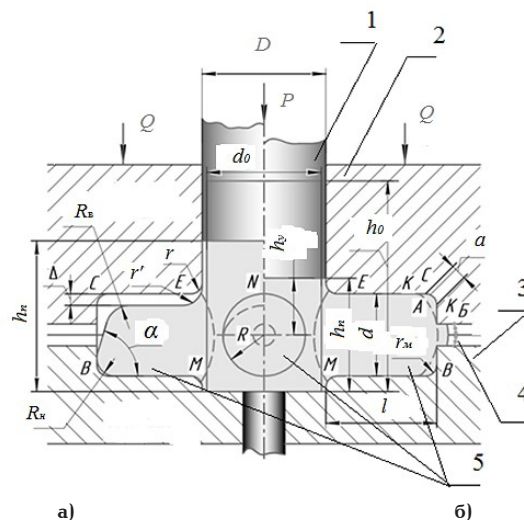


Рис. 1. Схема заполнения матрицы при штамповке поковки с отростками [3]: а — стадия истечения в боковую полость; б — стадия заполнения боковой полости. 1 — пуансон; 2 — полуматрица верхняя с приемником; 3 — полуматрица нижняя; 4 — компенсатор; 5 — полости под боковые отростки

Fig. 1. Scheme of matrix filling at stamping of forgings with tees [3]: a — stage of flow into the lateral cavity; b — stage of filling of the lateral cavity. 1 — punch; 2 — upper half-matrix with a receiver; 3 — lower half-matrix; 4 — compensator; 5 — cavities for lateral tees

чами, был произведен поиск и обзор публикаций по тематике «Процессы штамповки в разъемных матрицах поковок с боковыми отростками».

Известно, что при штамповке поковок, имеющих бурты и сплошные или полые отростки, расположенные под различными углами к оси поковки, рационально применять разъемные матрицы [1]. Последние в процессе деформирования должны быть плотно сжаты между собой, чтобы предотвратить вытекание металла в зазор.

При этом по условию удаления поковок из штампа могут иметь место два варианта технологического процесса штамповки в разъемных матрицах [2]: когда плоскость разреза матриц перпендикулярна направлению приложения деформирующего усилия и когда — параллельна.

Поковки крестовин и фланцев карданных валов, крестовин дифференциалов задних мостов автомобилей и тому подобные выдавливают в матрицы с разъемом, перпендикулярным вектору усилия деформации. Аналогично поступали при разработке процессов штамповки тройников авторы ниже приводимых публикаций, исследовавшие особенности формоизменения поковок с боковыми отростками.

В работе [3] установлено, что формоизменение деформируемой заготовки включает три стадии:

- осаживание заготовки в приемнике матрицы;
- истечение металла в боковые полости (стадия истечения) (рис. 1а);

— окончательное заполнение формы ручья и вытеснение избытка металла в компенсаторы (стадия заполнения) (рис. 1б).

Изначально заготовка размерами $d_0 \times h_0$ осаживается, после чего начинается течение металла в боковые полости диаметром d .

Наличие вертикальной σ_v и горизонтальной σ_r составляющих напряженного состояния прижимает металл к нижней поверхности полости под отроосток, вследствие чего частицы металла вблизи угла поворота E движутся по кривой радиусом $r' > r$. Между движущимся металлом и поверхностью ЕС образуется зазор Δ , наличие которого означает неполное оформление поперечника отроостка.

Выполненные эксперименты [1] выявили также, что из-за неравномерности скорости истечения металла при оформлении поперечного сечения отроостка в начале стадии истечения форма его торца не является плоской — верхняя кромка скруглена неким радиусом R_v , плавно уменьшающимся в сторону нижней кромки, причем явно $R_v > R_n$ (рис. 1а). Торце отроостка вначале наклонен к оси полости матрицы под углом α , но далее принимает более правильную форму, радиусы R_v и R_n становятся одинаковыми, α стремится к 90° .

Стадия заполнения выглядит в виде трех этапов (рис. 1б):

- течение металла в направлении зазора Δ , когда торцевая кромка заполняется неравномерно (угол C в меньшей степени заполнен, чем угол B);
- перемещение металла в углы полости компенсатора диаметром d_k . При этом фаска «а» оказывается постоянной по всей кромке отроостка;
- затекание металла в компенсатор.

Исследования силового режима штамповки поковок с боковыми отроостками [4] выявили три участка на графике усилие — путь, которые соответствуют:

- а) осадке заготовки приемной части матрицы;
- б) истечению в полости под отроостки;
- в) окончанию оформления поковки и вытеканию металла в компенсатор.

Установлено влияние характера течения металла на усилие деформирования и усилие раскрытия матриц. Определение последнего важно для обеспечения потребной силы сжатия полуматриц.

Показано, что раскрытию матриц в стадии окончания оформления поковки способствует ряд факторов, связанных с формой и размерами поковки,

а также с конфигурацией полости матрицы [4].

Экспериментами установлено, что для поковок с цилиндрическими отроостками наиболее выгодным относительным диаметром компенсатора d_k/d является значение из интервала $0,35 \dots 0,40$. Удельное усилие штамповки, определявшееся при 1100°C , составляло от 500 до 600 МПа, а давление раскрытия матриц от 300 до 350 МПа.

Отмечается также, что в определенный момент протекания стадии истечения (рис. 1а) в донной части нижней полуматрицы возникает очаг металла, не перемещающегося в продольном направлении, и возникает застойная зона.

При значительных смещениях металла на границе застойной зоны и пластического объема возникают зажимы, а продолжающееся до заполнения боковых полостей и компенсатора перемещение металла приводит к более глубокому проникновению зажима в тело поковки, что фактически превращает изделие в брак.

Характерным примером поковок, конфигурация которых обуславливает возникновение застойных зон в конечной стадии процесса, являются различного рода тройники.

Неоднократно показано [3, 1], что в случае равенства длин отроостков у тройников заполнение полости ручья происходит равномерно на протяжении всего процесса деформирования. Если отроостки не равной длины, то полость под отроосток меньшей длины заполняется раньше другой полости и становится застойным элементом, в дальнейшем вырождающимся в зажим как правило в основании короткого отроостка.

Для предотвращения возникновения этого вида дефекта в работе [5] предложено выполнять штамповку в два перехода.

Окончательно все вопросы по исключению вероятности образования зажимов у поковок столь сложной конфигурации может снять моделирование процесса при условиях конкретных форм и соотношений размеров поковок.

Исследователи процессов обработки металлов давлением используют методы моделирования, основанные на:

- теоретическом решении задач формоизменения изучаемого процесса, например, методом конечных элементов (МКЭ) [6–9] или методом верхней оценки [10];
- анализе с помощью известных программных

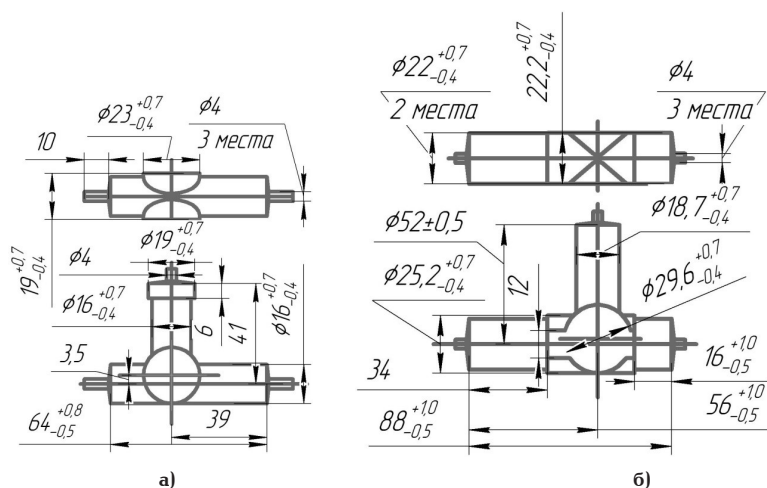


Рис. 2. Эскизы: а — «Тройник 122», б — «Тройник 35.06.090А»
Fig. 2. Sketches: а — «T-joint 122»; б — «T-joint 35.06.090A»

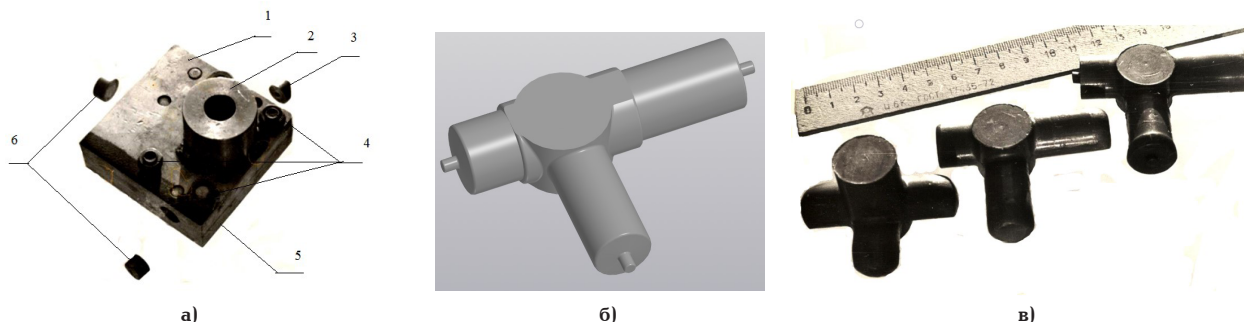


Рис. 3. Упрощенная оснастка для моделирования заполнения полостей ручья под «Тройник 122» на свинцовых заготовках (а), фотографии оформленного свинцового образца «Тройник 122» (б) и стадий его оформления (в): 1 — полуматрица верхняя; 2 — контейнер; 3 — заглушка полости под отросток с отверстием компенсатора; 4 — крепеж полуматриц; 5 — полуматрица нижняя; 6 — заглушки полостей под отростки

Fig. 3. Simplified tooling for modelling the filling of stream cavities for "T-joint 122" on lead blanks (a), photos of the "T-joint 122" lead sample (б) and stages of its design (в):

1 — upper half-matrix; 2 — container; 3 — plug of the cavity under the tee with the compensator hole; 4 — fixing of half-matrices; 5 — lower half-matrix; 6 — plugs of cavities for sprouts

продуктов (Deform-3D) [11–12], QForm и других;

— физических экспериментах в совокупности с математическим анализом [6, 7].

2. Моделирование процесса штамповки поковки «Тройник 122»

Принятые к разработке технологии производства поковок с боковыми отростками детали «Тройник 122» и «Тройник 35.06.090 А» (рис. 2) имеют близкие между собой размеры при неравной длине отростков на каждом из изделий, что, как указано выше, не гарантирует бездефектного оформления поковок. Решили, что физические эксперименты по отработке технологии штамповки изделий данной группы будут проводиться на модели поковки детали «Тройник 122».

В результате анализа материалов публикаций предыдущих периодов [1–5], а также принимая во внимание конфигурацию и размеры изделия «Тройник 122», на первом этапе исследований были поставлены задачи:

1. Провести эксперименты по штамповке «Тройника 122», как характерного представителя данной группы изделий, на свинцовых заготовках, чтобы выявить возможные внешние дефекты в поковке при деформировании в разъемном инструменте.

2. Отштамповать поковки детали «Тройник 122» из стальных заготовок и провести анализ их макроструктуры на предмет наличия или отсутствия зажимов.

3. Представить рекомендации по совершенствованию технологии штамповки поковок изделия «Тройник 122» в разъемных матрицах с учетом проведенного экспериментального деформирования.

По базовой технологии поковка «Тройника 122» изготавливалась на горячештамповочном прессе открытой штамповкой в многогнездовом штампе. При этом отход металла в облой достигал около 40 % от массы поковки и требовалась последующая калибровка.

Перевод на штамповку в разъемной матрице позволяет серьезно повысить коэффициент использования металла и снизить общую трудоемкость изготовления изделия путем исключения операции по удалению (обрезки) облоя, а также операции калибровки.

Для перевода «Тройника 122» на КГШП двойного действия были проведены некоторые конструктивные изменения отдельных элементов поковки

(рис. 2а).

Так, например, введены цилиндрические бобышки с двух сторон в центральной части «Тройника 122», которые неизбежно будут оформляться плоскими торцами цилиндрических пуансона и выталкивателя при выбранном горизонтальном разрезе матриц. Использование пуансона и выталкивателя с плоскими торцами обусловлено их большей стойкостью.

Процесс протекает в условиях близких к оптимальным при использовании заготовок с малым отношением высоты к диаметру. Максимальный диаметр, который можно вписать в контур поковки, располагается в плоскости осей отростков. При таком диаметре высота заготовки получается минимальной. Этим обосновывается выбор расположения плоскости разреза. Кроме этого, при принятом расположении ручья в полуматрицах первоначально идет равномерное заполнение полостей под отростки, что должно исключать образование зажимов.

Однако при последующем деформировании, когда металл заполнит полость малого отростка, но будет перемещаться в остальные две полости под отростки, возникает вероятность образования зажима.

С целью проверки наличия такого явления были проведены экспериментальные исследования формоизменения на свинцовых образцах с использованием упрощенной экспериментальной оснастки (рис. 3а).

Конструкция экспериментальной оснастки представляет собой две стянутые между собой болтами полуматрицы — верхнюю 1 и нижнюю 5, в плоскости разреза которых выполнены гравюры половин поковки в плане.

Размеры гравюр обеих половин соответствуют размерам «горячей» поковки «Тройник 122».

В торцах полостей под отростки предусмотрены отверстия компенсаторов, которые в процессе деформирования закрываются заглушками 3 и 6. Диаметры компенсаторов цилиндрической формы приняли равными 4 мм (соответствует минимальному значению $d_k/d = 0,2$, рекомендованному в [4]).

Исходная заготовка помещается в контейнер 2, одновременно служащий направляющим элементом пуансона (на рис. 3а не показан).

Свинцовые образцы изготавливали «в размер» профиля из отлитых заготовок выдавливанием

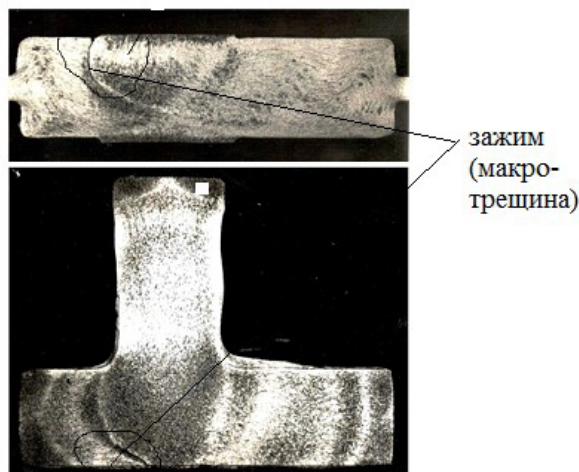


Рис. 4. Макроструктура «Тройника 122»
Fig. 4. Macrostructure of "T-joint 122"

с уковом около 4-х, что должно обеспечивать проработку структуры материала на все сечение образца.

Выполнена серия штамповок с получением за ход пресса окончательно оформленных поковок (рис. 3б), а также постадийным формированием тройника (рис. 3в).

Как видно на рис. 3, вначале отростки формируются практически одинаковыми по длине. При этом на начальной стадии (крайний правый образец) поведение металла на торцах отростков четко соответствует указанному в [1], т.е. поверхность, прилегающая к верхнему углу, имеет радиус значительно большей кривизны, чем поверхность, прилегающая к нижнему углу. Таким образом, заполнение верхней гравюры на этой стадии существенно отстает от заполнения нижней гравюры.

В дальнейшем заполнение гравюры становится более равномерным и отростки по форме становятся практически одинаковыми (средняя фигура). Их окончательные форма и размеры достигаются в момент начала вытекания металла в компенсирующие полости.

На рис. 3б видны «хвостики» металла, вышедшего в компенсирующие полости.

При визуальном осмотре образцов полученных моделей поковки «Тройник 122» (рис. 3б) подтвердился прогноз о качественном заполнении ручья с оформлением на конце бокового отростка утолщения заданного размера — $\varnothing 19$ мм.

На разрезанных размерах в двух продольных направлениях образцах зажимов не обнаружено.

Опираясь на полученные результаты деформирования свинцовых образцов, продолжили отработку технологии штамповки поковки «Тройник 122» на образцах из стали. Был изготовлен сменный инструмент под рабочий блок пресса двойного действия 5000×5000 КН и выполнена опытная партия «Тройника 122» из стали 20.

Изучение макроструктуры стальных изделий привело к обнаружению макротрещин, являющихся следствием довольно глубокого зажима (рис. 4).

Такие трещины не заковываются и служат местом разрушения детали при эксплуатации. Они, как правило, визуально не выявляются.

Следовательно, чтобы обеспечить гарантии получения годных поковок, необходимы дополнительные исследования.

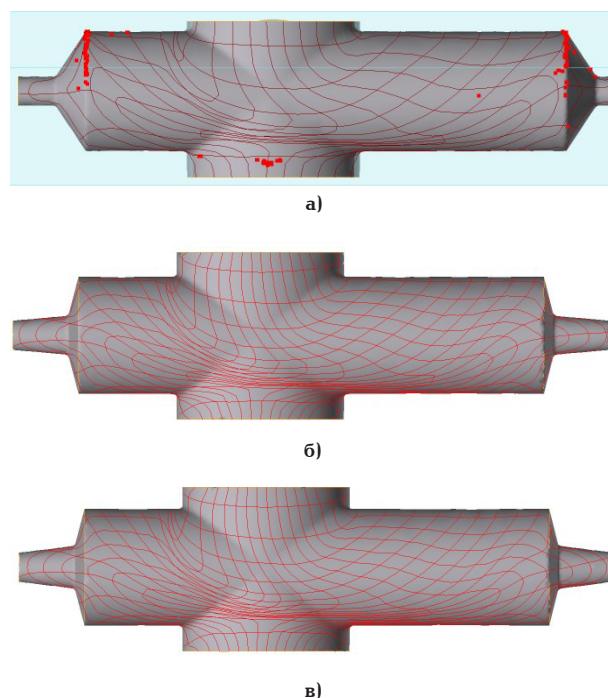


Рис. 5. QForm модели при диаметре заготовки 18 мм:

- а — компенсатор цилиндрической формы;
- б — компенсатор конический с углом 5° ;
- в — компенсатор конический с углом 7°

Fig. 5. QForm of the model at a blank diameter of 18 mm:

- а — cylindrical compensator;
- б — tapered compensator with 5° angle;
- в — tapered compensator with 7° angle

Таким образом, перешли ко второму этапу исследований, на котором было решено моделировать процесс в программном продукте QForm, так как в распоряжении исследователей имеется данная программа, а также наработан положительный опыт такой работы, изложенный, например, в [13–15].

Здесь преследовалось решение такой задачи, как: добиться моделированием выявления таких размеров исходной заготовки и конфигурации инструмента, которые бы отвечали условиям изготовления качественных изделий. Поэтому в процессе QForm — моделирования принимали разные варианты диаметра исходной заготовки, а также форму и размеры компенсаторов.

Посчитали, что такими вариантами будут следующие:

- 1) на концах отростков изменить конфигурации компенсаторов с цилиндрической на коническую, с варьированием их конусности от 5° до 7° ;
- 2) варьировать значениями диаметров исходной заготовки от 18 мм (как при опытной штамповке) до 27 мм с шагом в 1 мм. При этом длины принимать согласно условиям постоянства объема.

Предположительно какое-то из указанных действий должно обеспечить непрерывность поступления пластичного металла в отросток на протяжении всего процесса деформирования и исключить формирование застойной зоны, образующей зажим. Хотя при этом несколько увеличится расход металла.

Полученные результаты моделирования представлены картинками проблемных с точки зрения возможного образования зажима сечений формованных поковок (рис. 5–7).

Вероятность образования зажимов в моделях показывает плотность и степень неравномерно-

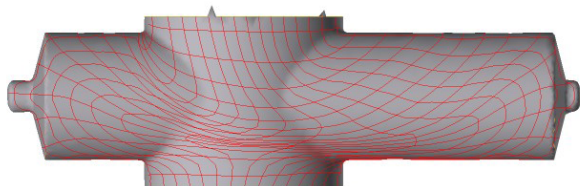


Рис. 6. QForm модель с исходными данными: диаметр заготовки 25 мм, компенсатор цилиндрический
Fig. 6. QForm model with initial data: blank diameter 25 mm, cylindrical compensator

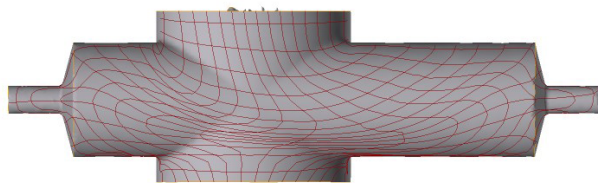


Рис. 7. QForm модель с исходными данными: диаметр заготовки 27 мм, компенсатор цилиндрический
Fig. 7. QForm model with initial data: blank diameter 27 mm, cylindrical compensator

сти расположения лагранжевых линий. В случаях значительной неравномерности их расположения, а также плотной местной локализации предполагается образование очага застоя металла, который в дальнейшем развивается в зажим.

3. Обсуждение результатов экспериментов по моделированию в QForm

Выполнили следующие шаги моделирования:

- расчет варианта, проходившего экспериментальное моделирование;
- расчет с компенсатором в 5° и неизменяемыми размерами заготовки;
- расчет с компенсатором в 7° и неизменяемыми размерами заготовки;
- расчет с цилиндрическим компенсатором и диаметром заготовки в 25 мм;
- расчет с цилиндрическим компенсатором и диаметром заготовки в 27 мм.

1. Как видим на рис. 5а, перемещение объемов деформируемого металла крайне неравномерно: в правом отростке лагранжевые линии располагаются в более плавном порядке, практически на одинаковых дистанциях, в то время как влево перемещение менее упорядочено и местами линии практически смыкаются, образуя складки. В зоне таких складок можно прогнозировать с большой долей вероятности образование зажимов. Существенно и то, что правый отросток потока металла идет исключительно из-под пуансона (сверху), а левый отросток формируется встречными потоками с двух сторон, что создает неравномерность структуры изделия.

Красные точки по торцам поковки показывают места недооформления кромок обоих отролков, что также вызывает сомнение в получении качественной поковки. Последнее может быть не критично для готовой детали, если предусмотрен достаточный припуск.

2. Картина на рис. 5б имеет схожие черты с отмеченными для рис. 5а в части расположения лагранжевых линий: та же неравномерность в соответствующих частях поковки вплоть до слияния вблизи нижнего контура. Зона слияния очень про-

тяженная и вероятность зажима достаточно велика. При этом отсутствует прогноз не заполнения кромок.

3. Изменение угла конуса компенсатора на 7° (рис. 5в) серьезно не сказалось на обеспечении равномерности дистанций между лагранжевыми линиями в области левого отростка. Зона слияния лагранжевых линий критична по протяженности. Отсутствует прогноз не оформления кромок отролков.

4. Модель по рис. 6 демонстрирует, что лагранжевые линии в зоне, прилегающей к границе нижнего центрального участка и правого бокового отростка, сближены. Однако плотность сближения их имеет меньший уровень (касание или пересечение отсутствуют), чем в предыдущем случае, что дает определенные гарантии отсутствия складкообразования.

5. Вариант моделирования по рис. 7: сетка лагранжевых линий достаточно равномерная с плавными траекториями этих линий. Такое состояние явно не предвещает образования какого-либо зажима. Следует учесть, что в данной модели показано возможное некоторое удлинение отростка-компенсатора. В таком случае необходимо предусматривать дополнительный объем металла заготовки.

Таким образом, по результатам приведенных обсуждений вариантами бездефектной штамповки следует принять модели, отвечающие исходным данным по приведенным выше пунктам 4 и 5. Но следует учитывать, что выполненные при моделировании расчеты силы деформирования для варианта по рис. 7 значительно выше, чем для варианта по рис. 6.

Выводы

1. Анализ публикаций по рассматриваемому вопросу показал, что при штамповке в разъемных матрицах изделий с отросками при различающихся размерах последних есть вероятность брака вследствие образования внутренних дефектов — зажимов.

2. Экспериментальные исследования по штамповке «Тройник 122» из свинцовых заготовок не показали возможности образования зажимов в теле поковки. При этом хорошее качество заполнения гравюры ручья обеспечивалось цилиндрическими компенсирующими полостями.

3. Образцы макрошлифов отштампованных из стали поковок «Тройник 122» показали наличие глубоких зажимов, являющихся следствием неравномерного встречного перемещения потоков металла деформируемой заготовки.

4. Выполненное моделирование в QForm горячего деформирования стальной заготовки в разъемной матрице для получения поковки детали «Тройник 122» по вариантам с варьированием параметров заготовки (диаметр) и инструмента (форма компенсатора) позволило выявить наиболее благоприятные условия, исключающие образование зажимов. При этом штамповка выполняется в один переход на прессе двойного действия.

Заключение

Для промоделированного типоразмера изделия наиболее подходящим следует считать штамповку из заготовки диаметром 25 мм либо 27 мм с выполнением в инструменте компенсаторов цилиндрической формы. Окончательный выбор сечения заготовки определяется наличием профиля соот-

ветствующего диаметра в номенклатуре предприятия, а также удобством нарезки заготовок по длине сдвигом, например, в штампе с редуцированием, что обеспечивает точное дозирование объема заготовки. При этом в случае необходимости проводить допустимые изменения чертежа изделия.

Таким образом, в алгоритм проектирования технологического процесса штамповки тройников рекомендуется предусматривать моделирование по показанной в статье схеме с использованием программного продукта QForm. Такой подход можно считать практической новизной выполняемой разработки в сравнении с применяемыми в настоящее время в производстве подходами.

Для изделия «Тройник 35.06.090 А» моделирование в QForm показало результаты, аналогичные представленным на рис. 5–7.

Список источников / References

1. Ребельский А. В., Протопопов О. В., Кузнецов А. В. [и др.] Штамповка поковок в разъемных матрицах // Кузнечно-штамповочное производство. 1962. № 12. С. 3–8.
2. Rebel'skiy A. V., Protopopov O. V., Kuznetsov A. V. [et al.] Shtampovka pokovok v raz'yemnykh matritsakh [Stamping of forgings in split dies]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1962. No. 12. P. 3–8. (In Russ.).
3. Ребельский А. В., Протопопов О. В., Савин А. М. Изготовление поковок в штампах с разъемными матрицами // Опытные работы по штамповке и выдавливанию: сб. ст. / Моск. дом науч.-тех. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского. Москва: [б.и.], 1958. С. 12–14.
4. Rebel'skiy A. V., Protopopov O. V., Savin A. M. Izgotovleniye pokovok v shtampakh s raz'yemnymi matritsami [Manufacturing forgings in dies with split dies] // Opytnyye raboty po shtampovke i vydavlivaniyam: sb. st. *Experimental work on stamping and extrusions: collection of articles*. Moscow, 1958. P. 12–14. (In Russ.).
5. Поляков И. С. Особенности штамповки поковок с боковыми отростками в закрытых штампах // Кузнечно-штамповочное производство. 1964. № 6. С. 16–20.
6. Polyakov I. S. Osobennosti shtampovki pokovok s bokovymi otrostkami v zakrytykh shtampakh [Features of stamping forgings with side processes in closed dies]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1964. No. 6. P. 16–20. (In Russ.).
7. Поляков И. С., Золотницкий В. А. Штамповка поковок типа крестовин в закрытых штампах // Кузнечно-штамповочное производство. 1964. № 7. С. 3–6.
8. Polyakov I. S., Zolotnitskiy V. A. Shtampovka pokovok tipa krestovin v zakrytykh shtampakh [Stamping of cross-type forgings in closed dies]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1964. No. 7. P. 3–6. (In Russ.).
9. Кузнецов А. В., Протопопов О. В. Двухпереходный технологический процесс горячего выдавливания стальных поковок в разъемных матрицах // Кузнечно-штамповочное производство. 1966. № 7. С. 18–20.
10. Kuznetsov A. V., Protopopov O. V. Dvukhperekhodnyy tekhnologicheskiy protsess goryachego vydavlivaniya stal'nykh pokovok v raz'yemnykh matritsakh [Two-pass technological process of hot extrusion of steel forgings in split dies]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1966. No. 7. P. 18–20. (In Russ.).
11. Jing Y., Haibao Wu., Xuedao Sh. Shape-property synergistic control in closed die forging of large-diameter copper alloy valve body. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 128, no. 5-6. P. 2137–2146. DOI: 10.1007/s00170-023-11873-5.
12. Hawryluk M., Ziemba J., Janik M. [et al.]. Wear Analysis of Forging Tools Used in an Industrial Production Process – Hot Forging in Closed Dies of the «Head-Disk» of an Engine Valve Forging. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 22. P. 7063. DOI: 10.3390/ma14227063.
13. Huang K. M., Hsu M. N., Ramanuel J. [et al.] Improvement of product quality using negative clearance grooved punch. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125, no. 1-2. P. 479–492. DOI: 10.1007/s00170-022-10383-0.
14. Hawryluk M., Rychlik M., Ziemba Ja. [et al.]. Analysis of the production process of the forked forging used in the excavator drive system in order to improve the currently implemented technology by the use of numerical modeling. *Materials Science-Poland*. 2021. Vol. 39, no. 2. P. 227–239. DOI: 10.2478/msp-2021-0020.
15. Алиева Л. И., Титов А. В., Корденко М. Ю. Моделирование процессов поперечного бокового выдавливания // Обработка материалов тиском. 2019. № 1. С. 35–44. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-35(48).
16. Aliyeva L. I., Titov A. V., Kordenko M. Yu. Modelirovaniye protsessov poperechnogo bokovogo vydavlivaniya [Modeling of transverse lateral extrusion processes]. *Obrobka materialiv tiskom. Processing of Materials with a Press*. 2019. No. 1. P. 35–44. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-35(48). (In Russ.).
17. Zhang Y., Sun H., Liu B. [et al.]. Surface crack analysis of the steering shaft gear after carburizing and quenching. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 141. P. 106680. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106680.
18. Ашкеев Ж. Б., Андреященко В. А., Абишкенов М. Ж., Буканов Ж. У. Определение напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 4. С. 5–12. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.01. EDN: YPTVHD.
19. Ashkeyev Zh. B., Andreyashchenko V. A., Abishkenov M. Zh., Bukanov Zh. U. Opredeleniye napryazhennogo sostoyaniya i usiliya deformatsii sharoobraznykh zagotovok v zakrytoy matritse [Determination of the stress state and the force of deformation of ball-shaped billets in a closed matrix]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021. No. 4. P. 5–12. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.01. EDN: YPTVHD. (In Russ.).
20. Gryaznov V. V., Konovalov V. A., Kormakov D. A., Markechko I. V., Merkushev E. N. Simulation of the isothermal stamping of cryogenic equipment body parts forgings // *Oil and Gas Engineering (OGE-2021). AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2412, no. 1. P. 040013. DOI: 10.1063/5.0074976.
21. Кормаков Д. А., Маркечко И. В. Исследование технологических параметров операции прошивки с радиальным выдавливанием // Инновации и инвестиции. 2020. № 9. С. 153–156. EDN: MCDKCU.
22. Kormakov D. A., Markechko I. V. Issledovaniye tekhnologicheskikh parametrov operatsii proshivki s radial'nym vydavlivaniyem [Investigation of technological parameters of the radial extrusion firmware operation]. *Innovations and Investments*. 2020. No. 9. P. 153–156. EDN: MCDKCU. (In Russ.).
23. Грязнов В. В., Кормаков Д. А., Меркушев Е. Н. [и др.]. Исследование и моделирование процессов горячей штамповки равнопроходного тройника диаметром 530 мм, получаемого из стали 10Г2ФБЮ // Ученые Омска — региону: материалы VI Регион. науч.-техн. конф. (Омск, 24–26 мая 2021 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. С. 15–19. EDN: WICSMX.
24. Gryaznov V. V., Kormakov D. A., Merkushev E. N. [et al.]. Issledovaniye i modelirovaniye protsessov goryachey shtampovki ravnopromkhnogo troynika diametrom 530 mm, poluchayemogo iz stali 10G2FBYu [Research and modeling of hot stamping processes of an equal-bore tee with a diameter of 530 mm, obtained from 10G2FBYu steel] // *Uchenyye Omska — regionu. Scientists of Omsk — to the region*. Omsk, 2021. P. 15–19. EDN: WICSMX. (In Russ.).

ГРЯЗНОВ Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566730

AuthorID (SCOPUS): 57516935900

Адрес для переписки: gryaznov-1946@mail.ru

КОНОВАЛОВ Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9702-2809

AuthorID (РИНЦ): 684448

AuthorID (SCOPUS): 57398211400

Адрес для переписки: Valerij.Kononov.1956@mail.ru

КОРМАКОВ Дмитрий Александрович, старший преподаватель кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1699-2068

AuthorID (РИНЦ): 831541

ORCID: 0000-0001-7101-0140

AuthorID (SCOPUS): 57210976601

Адрес для переписки: dakormakov@omgtu.ru

МАРКЕЧКО Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1444-3170

AuthorID (РИНЦ): 566729

AuthorID (SCOPUS): 57210977051

Адрес для переписки: markechko55@mail.ru

МЕРКУШЕВ Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566731

AuthorID (SCOPUS): 9249134900

Адрес для переписки: emerkushev@rambler.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 17.12.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 29.04.2025.

GRYAZNOV Vladimir Vasilevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 566730

AuthorID (SCOPUS): 57516935900

Correspondence address: gryaznov-1946@mail.ru

KONOVALOV Valeriy Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9702-2809

AuthorID (RSCI): 684448

AuthorID (SCOPUS): 57398211400

Correspondence address: Valerij.Kononov.1956@mail.ru

KORMAKOV Dmitry Aleksandrovich, Senior Lecturer of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1699-2068

AuthorID (RSCI): 831541

ORCID: 0000-0001-7101-0140

AuthorID (SCOPUS): 57210976601

Адрес для переписки: dakormakov@omgtu.ru

MARKECHKO Igor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1444-3170

AuthorID (RSCI): 566729

AuthorID (SCOPUS): 57210977051

Correspondence address: markechko55@mail.ru

MERKUSHEV Evgeniy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 566731

AuthorID (SCOPUS): 9249134900

Correspondence address: emerkushev@rambler.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 17.12.2024; approved after reviewing 20.03.2025; accepted for publication 29.04.2025.