

УДК 621.7.011

DOI: 10.30987/2223-4608-2021-8-3-11

**В.А. Дёмин**, д.т.н.

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),

**С.Н. Ларин**, д.т.н.

(Тульский государственный университет, 300012, Тула, пр. Ленина, 92)

E-mail: va\_demin@bk.ru

## **Современные направления и перспективы развития технологий обработки металлов давлением в машиностроении\***

*Представлен обзор работ, направленных на развитие современных технологий обработки металлов давлением.*

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением; технологии; перспективы развития.

**V.A. Demin**, Dr. Sc. Tech.

(Bauman State Technical University of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005),

**S.N. Larin**, Dr. Sc. Tech.

(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

## **Current trends and outlooks in development of metal forming technologies in mechanical engineering**

*There is presented a review of works directed to the development modern technologies for metal forming.*

**Keywords:** metal forming; technologies; development outlooks.

В современном машиностроении существенную роль играют инновационные технологии, позволяющие получать изделия заданного качества при минимальной себестоимости. В тоже время качество машиностроительной продукции зависит от качества заготовок. Одним из способов получения заготовок, является обработка металлов давлением. Инновационные технологии в обработке металлов давлением для транспортного машиностроения рассмотрены в работе [1].

В данной работе рассмотрим наиболее интересные исследования для общего машиностроения.

\* Работа выполнена в рамках гранта НШ-2601.2020.8.

В работах [2, 3] исследован процесс получения отверстий в титановых сплавах вращающимся пуансоном. На заготовках толщиной 5 мм выполняли отверстия диаметром 2...4 мм. Получение таких отверстий пробивкой не рекомендуется (справочник В.П. Романовского), а попытка сверлить, привела к выходу из строя всех комплектов инструмента. На рис. 1 показана типовая деталь с большим количеством отверстий.

Была спроектирована и изготовлена установка для получения отверстий вращающимся пуансоном, которая позволила исследовать технологический процесс и найти оптимальные режимы штамповки.

Моделирование процесса программным

комплексом QForm VX, позволило определить основные параметры пробивки вращающимся пуансоном заготовок из никелевых сплавов ХН62ВМЮТ-ВД. На рис. 2 показано изменение температурного поля в процессе пробивки. Учитывая свойство вольфрама повышать пластичность с ростом температуры [2], пуансоны предварительно подводили к заготовке до контакта и осуществляли разогрев за счет сил трения, что позволяло нагреть сверло до температуры 1000...1100 °С и повысить его эксплуатационные свойства.

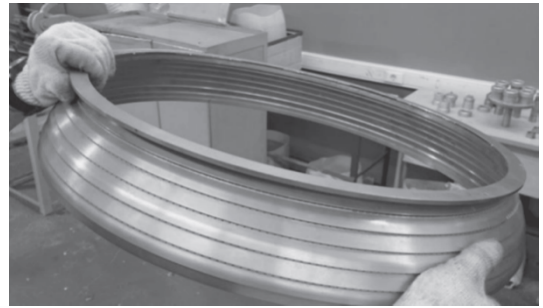


Рис. 1. Типовая деталь с большим количеством отверстий

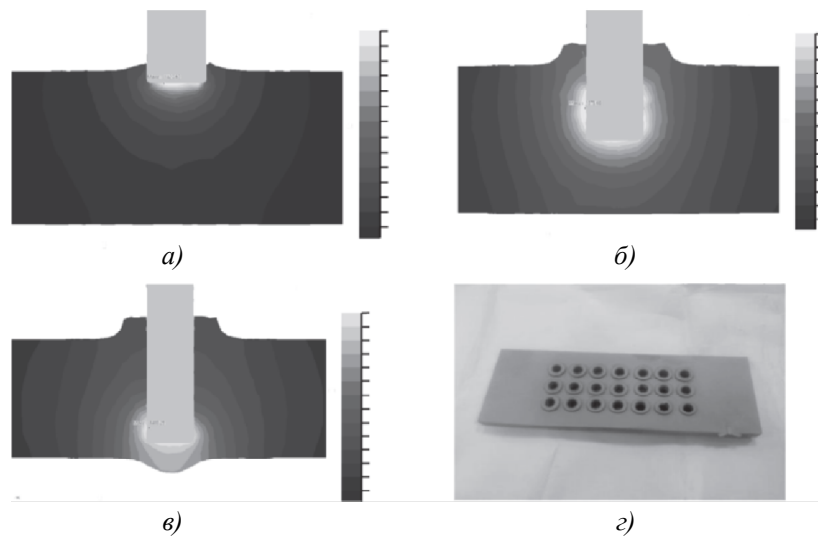


Рис. 2. Изменение температурного поля в процессе пробивки. Максимальная температура: *а* – в начале процесса – 1420 °С; *б* – в середине процесса – 1579 °С; *в* – в конце процесса – 1488 °С; *г* – заготовка после пробивки

Во избежание окисления вольфрама сверло покрывалось стеклоэмалью ЭВТ-24.

В работе [3] приведено исследование изготовления отверстий в заготовках из жаропрочного титанового сплава ВТ20.

Процесс пробивки вращающимся пуансоном рационально вести по следующей схеме: быстро подвести пуансон до контакта с заготовкой; разогреть металл в точке контакта до 900...1000 °С (в течение примерно 50 с) и далее осуществлять процесс с частотой вращения 10 000 об/мин и подачей 5 мм/мин. Эти режимы обеспечивают минимальный износ инструмента.

Отверстия, полученные вращающимся пуансоном, показаны на рис. 3.

Отмечено, что отверстия получают небольшую конусность формы. Однако отклонение величины диаметра у верхнего и нижнего торцов в среднем имеет значение 0,08 мм.

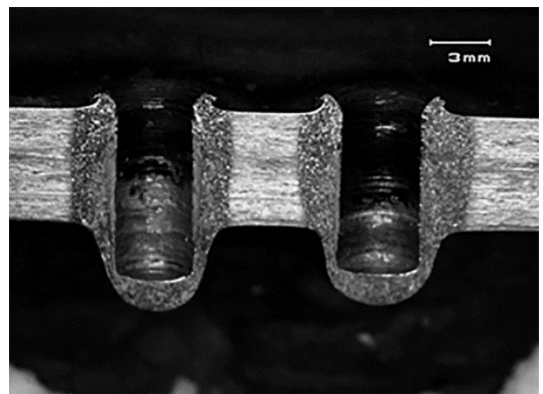


Рис. 3. Отверстия, полученные вращающимся пуансоном

Одной из наиболее наукоемких технологий в обработке металлов давлением является прокатка валов. В работе [4] выполнено моделирование в программе QForm условий образования кольцевого разрушения при горячей радиально-сдвиговой прокатке. В качестве

критерия разрушения принят модифицированный критерий Кокрофта-Лэтэма. Также были построены температурные поля деформационного разрушения.

Осуществлена экспериментальная проверка результатов моделирования путем прокатки прутков из жаропрочного сплава с кольцевым разрушением и без разрушения. Кольцевое разрушение связано с интенсификацией деформационного разогрева при увеличении скорости вращения валков.

Сравнение результатов моделирования с экспериментально разрушенным образцом показало, что приоритетной причиной разрушения является чрезмерный деформационный разогрев металла в узкой кольцевой области. В данном исследовании применимость модифицированного критерия Кокрофта-Лэтэма для оценки условий разрушения не получила экспериментального подтверждения. Выявлено существенное расхождение прогнозируемой локализации разрушения с экспериментальными данными по его местоположению и зависимости от скорости прокатки.

Особый интерес представляют исследования влияния на процессы обработки металлов давлением трения, изменения относительного удлинения и предела прочности материала. В работе [5] исследовано влияние фактора трения на результаты моделирования поперечно-клиновой прокатки. Моделирование выполнялось в программном комплексе QForm. Применялся фактор трения по Леванову. Причем использовали разные величины фактора трения на боковой поверхности и на плоских поверхностях. Фактор трения на боковой поверхности изменяли от 0,5 до 10, а фактор трения на плоских поверхностях изменяли от 0,5 до 4.

В качестве примера на рис. 4 показан результат моделирования при факторе трения 2 и 0,5 на боковой и плоской поверхности, соответственно.

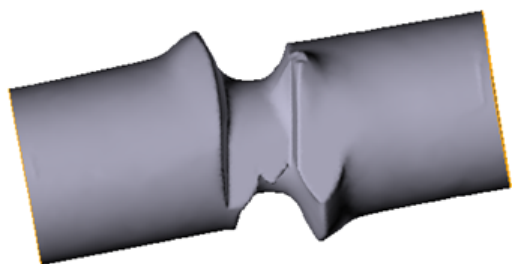


Рис. 4. Результат моделирования при факторе трения 2 и 0,5 на боковой и плоской поверхности, соответственно

Наилучший результат получен при факторе трения на наклонных поверхностях 10, для плоских поверхностей фактор трения должен быть больше 0,9. Результат моделирования для этого случая показан на рис. 5.

Для листовой штамповки влияние перечисленных выше параметров на процесс деформирования описано в работе [6].

Сегодня подавляющее количество деталей изготавливается из стали 08. Поэтому в справочниках по листовой штамповке основные параметры для расчета режимов изготовления детали приводятся для этой стали. В тоже время в справочной литературе [4] приводится значение предела прочности для этой стали  $\sigma_B = 330 \text{ н/мм}^2$ , относительное удлинение  $\delta = 33 \%$ , хотя по ГОСТ эти значения могут меняться  $\sigma_B = 300 \dots 500 \text{ н/мм}^2$ , а  $\delta = 4 \dots 44 \%$ .

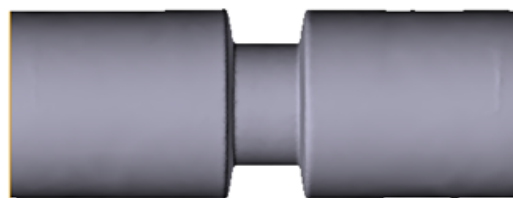


Рис. 5. Результат моделирования при факторе трения 10 и 0,9 на боковой и плоской поверхности, соответственно

Другим фактором, который необходимо учитывать при анализе процессов листовой штамповки – разнотолщинность. Например, для стали 08 при номинальной толщине 1 мм и нормальной точности, толщина листа может меняться в диапазоне от 0,9 до 1,1 мм.

Было проведено моделирование в программном комплексе AutoForm, с использованием модуля Sigma, процесса вытяжки. Полученная FLD диаграмма показана на рис. 6. Линией на рисунке обведены точки (деформации) для номинальных значений входных факторов, а тенью возможные значения деформаций в плоскости листа.

Анализ результатов моделирования показывает, что при расчете по номинальным значениям факторов, процесс вытяжки пройдет без разрушения заготовки. Однако колебания параметров заготовки может привести к существенному изменению характера протекания процесса штамповки и ее разрушению в процессе деформирования. Также увеличивается вероятность потери устойчивости фланца.

В связи с этим предложено использовать методы планирования эксперимента, для по-

лучения уравнения регрессии и определения параметров, при которых произойдет

разрушение заготовки.

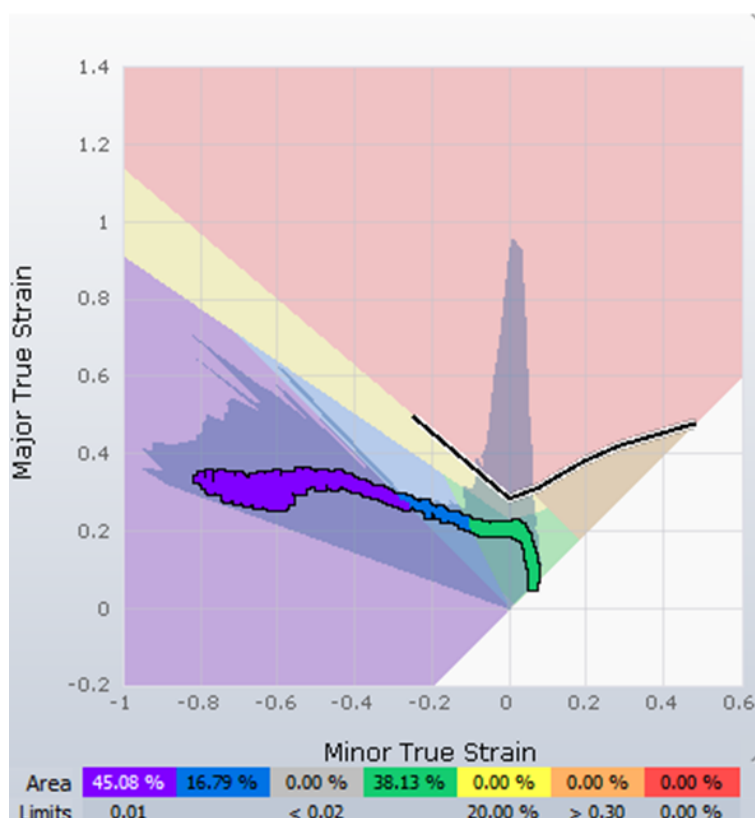


Рис. 6. FLD диаграмма для процесса вытяжки

Большинство материалов применяемых для листовой штамповки обладают анизотропией свойств. Однако из-за сложности анализа процессов штамповки с анизотропным материалом очень часто применяется решение для изотропного материала, поэтому работы с учетом анизотропии материала заготовки являются актуальными.

При проектировании процесса вытяжки одной из первых задач, которую необходимо решить, является определение размеров и формы заготовки. Причем для учета искажения формы фланца, из-за анизотропии исходного материала, предлагается к заготовке добавлять припуск на обрезку, который обрезается после вытяжки. Однако практически во всех справочниках, припуск на обрезку зависит для цилиндрических деталей от полной высоты детали и отношения высоты детали к ее диаметру. Для деталей с широким фланцем зависит от диаметра фланца и отношения диаметра фланца к диаметру детали. Таким образом припуски получены экспериментально для неизвестных материалов с неизвестной анизотропией.

Это приводит к тому, что по справочнику

В.П. Романовского необходимо добавлять припуск на обрезку 2,5 мм, а по справочнику Л.И. Рудмана – 4 мм. В литературе встречаются рекомендации, что припуск на обрезку вообще не нужен, так как в процессе вытяжки проходит интенсивное утонение материала (рис. 7). Поэтому было проведено исследование влияния на припуск анизотропии исходной заготовки. В качестве показателя анизотропии использовали плоскостной коэффициент анизотропии [7]:

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2},$$

где  $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$  – коэффициенты анизотропии, определенные из заготовок, вырезанных из листа металла под углами  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и вдоль направления проката.

Результаты моделирования показали, что анизотропия материала оказывает значительное влияние на припуск под обрезку. В зависимости от выбранного материала припуск на обрезку будет находится для  $\Delta r = 0,5$  в пределах от 2,9 до 3,5; для  $\Delta r = 0,7$  в пределах от 3,2...3,7 до 3,5; для  $\Delta r = 1$  в пределах от 3,8 до 4.

При незначительном значении анизотропии или больших допусков на фланец детали, размеры готовой детали будут находиться в тре-

буемом допуске, что позволяет исключить из технологического процесса обрезку фланца.

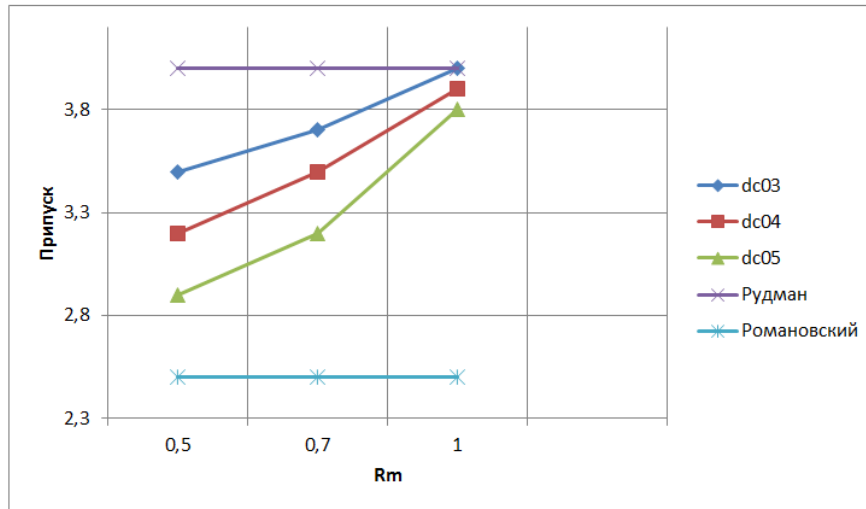


Рис. 7. График сравнения данных, полученных в результате моделирования и справочных

Одной из технологий, позволяющих добиться высоких степеней деформации является холодная торцовая раскатка (рис. 8) [8]

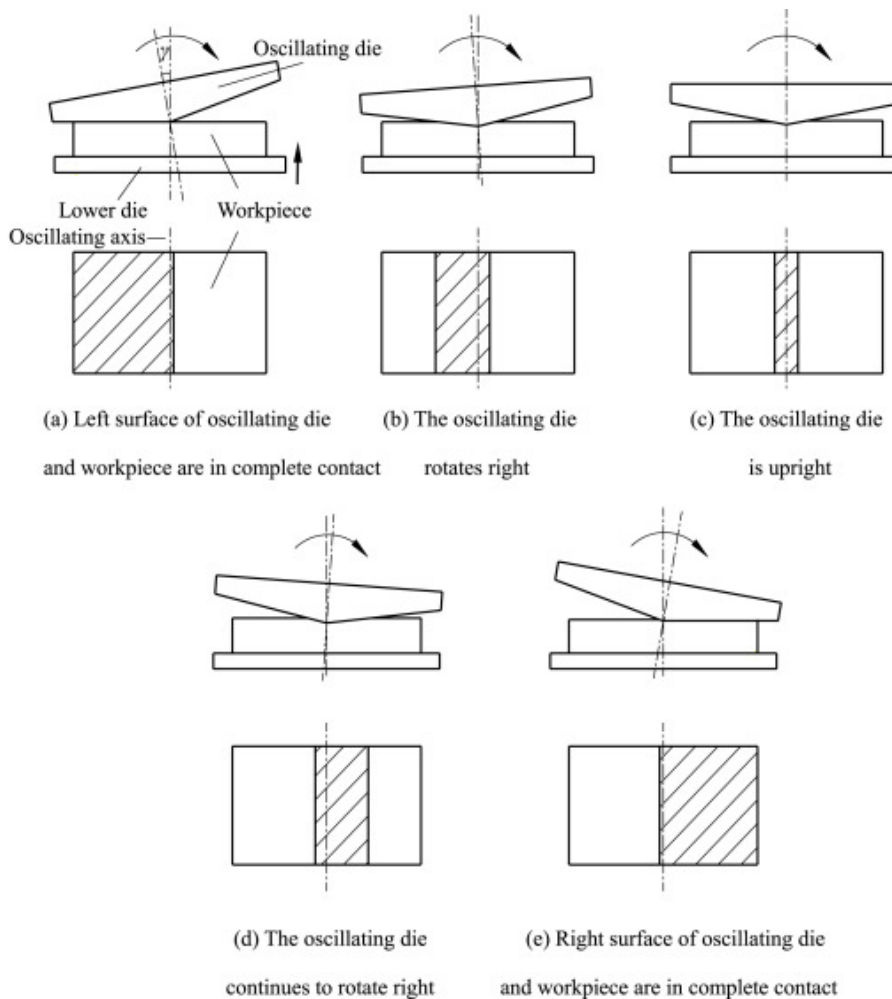


Рис. 8. Схемы торцовой раскатки



Это особый процесс, который реализует интегральное формование компонентов за счет локальной деформации. В отличие отковки, площадь контакта при холодной торцовой раскатке между инструментом и заготовкой довольно мала, так что нагрузка, необходимая при торцовой раскатке в отличие отштамповки, составляет лишь малую часть от нагрузки при обычной штамповке. Кроме того, холодная торцовая раскатка подходит для формования тонкостенных компонентов со сложной геометрией, а качество ее поверхности, геометрическая точность и механические свойства довольно высоки.

Многие ученые приложили усилия и внесли свой вклад в области холодной ротационнойковки. Было проведено множество исследований механизмов деформации. После многих лет развития данной технологии некоторые операции холодной ротационнойковки были применены в производстве фланцев, заклепок, конических зубчатых колес и других промышленных товаров с использованием холодной торцовой раскатки и экспериментальных методов.

Данную технологию, по приведенной на рис. 8 схеме, можно использовать для холодной штамповки тонкостенных корпусов переменной толщины со сложными крошечными выступами (например, различной мелкой электроники) при линейном перемещении перемещающегося пуансона.

Детали дисков большого диаметра являются ключевыми компонентами в ядерной энергетике, нефтехимии, сжижении угля, аэрокосмической, глубоководной разведке и других областях. В настоящее время основными методами формования дисков большого диаметра являются сварка и резка листового металла. Недостатками этих процессов являются большой припуск на обработку; большие потери инструмента; большая сила удара молотка и большая погрешность толщины поковок. Ротационная ковка несколькими вращающимися коническими инструментами – это передовая технология непрерывного формования металлов. У нее есть много преимуществ, таких как высокая точность, экономия материала и низкий уровень шума [9] (рис. 9).

Ротационная ковка несколькими вращающимися коническими инструментами – это технология формования металлов с нечетным числом конических роликов. В данной статье в качестве примера взяты пятиконусные ролики. В соответствии с центральной осью оборудования несколько конических роликов (не-

четное число) устанавливаются с одной стороны относительно оси, а четное число роликов – с другой. Скользящая поперечная балка заставляет инструмент двигаться вниз, а заготовка вращается вокруг оси, и приводится в движение вращающейся нижней матрицей. Когда инструмент контактирует с заготовкой реализуется ковка заготовки. В процессе деформирования часть валка с конусом, образует ступеньку на заготовке, которая прокатывается коническим следующим валком. Когда толщина заготовки достигает заданного значения, ползун перестает двигаться вниз, а матрица продолжает вращаться, формируя чистовую поверхность (см. рис. 9).

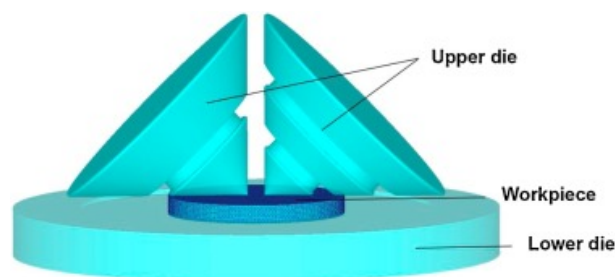


Рис. 9. Схема ротационнойковки несколькими вращающимися инструментами

Поковки различных колец широко используются в нефтехимической, энергетической, аэрокосмической, ядерной и других отраслях промышленности [10]. Например, диск турбины как основной вращающийся элемент авиационного двигателя весьма сложно изготовить. Точность изготовления диска турбины имеет жизненно важное значение для производительности авиационного двигателя. Поэтому для промышленного производства очень важно повысить точность прокатки поковок колец.

Ковка колец – это процесс пластической формовки, который увеличивает диаметр, уменьшает толщину стенки и формирует профиль сеченияковки колец. Диаметр радиального сеченияковки кольца в процессе прокатки постоянно увеличивается. Чертеж узла радиальной и осевой прокатки поковок колец показан на рис. 10.

Поковки больших колец являются важными частями строительной техники и оборудования, которые широко используются в ветроэнергетике, атомной энергетике, нефтехимической промышленности, авиакосмической промышленности и других важных областях. Такие большие детали трудно заменить, они имеют длительный срок службы и тяжелые

условия работы, поэтому для обнаружения дефектов внутри этих больших деталей требуется ультразвуковой контроль [11].

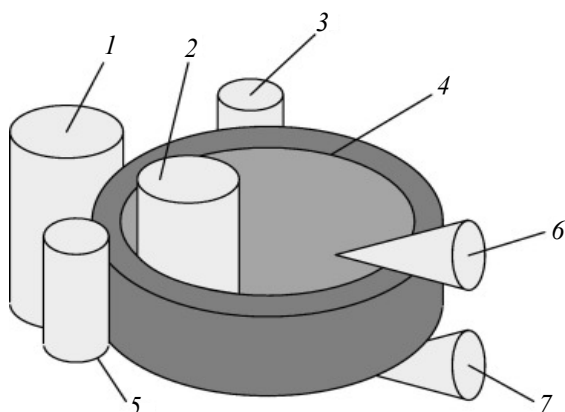


Рис. 10. Радиальная и осевая прокатка поковок колец

В процессе прокатки кольцевойковки поверхность заготовки подвергается давлению валков, что позволяет легко создавать различные приповерхностные дефекты, такие как пористость; трещины; защемление кожи; складки и т.д. (см. рис. 10). Эти дефекты имеют большое влияние на усталостную долговечность поковок больших колец, а также на то, что они легко вызывают точечную коррозию; отслаивание; усталостное разрушение и разрушение контактных поверхностей.

Стержневой и ведущий валки имеют разные скорости вращения. Приводной ролик активно вращается. Поковка кольца приводится в движение силой трения ведущего ролика, а стержневой ролик приводится в движение силой трения. Чтобы улучшить качество и технологию изготовления поковок колец и снизить процент брака, необходимо обеспечить точность формы и размеров поковки в процессе поковки. Однако из-за высокотемпературного состояния, множества факторов помех и огромного количества полученных данных качество мониторинга в реальном времени выполняется плохо.

Инкрементальные процессы объемного формования все чаще используются в промышленности из-за их экономичности и технологичности [12]. Эти процессы обладают высокой гибкостью и требуют меньше энергии, а также более компактных и простых инструментов и штампов.

Эти процессы обычно обеспечивают получение чистых форм изделий, увеличивая как степени формования, так и свойства полученных деталей по сравнению с обычными штам-

повочными операциями. Другими преимуществами инкрементальных процессов объемного формования является то, что общие силы, трение и износ инструмента ниже, несмотря на высокие местные нагрузки, приложенные к инструментам. Кроме того, эти процессы требуют меньших инвестиций с меньшими затратами на инструмент.

Примерами процессов инкрементного объемного формования являются орбитальное формование, ротационная обжимка или локализованно-инкрементальные процессыковки. Инкрементальные процессыковки могут выполняться в ЧПУ.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) различных металлических деталей стала эффективным и многообещающим методом производства объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурированных материалов за последние два десятилетия [13]. Однако большинство широко применяемых процедур ИПД страдают от неравномерного распределения приложенной деформации в обрабатываемых объемных металлах, что может привести к неблагоприятной микроструктурной неоднородности и слабым механическим характеристикам изделий.

Не так давно была внедрена многоосная инкрементная штамповка, как новый метод деформации, и была изучена его применимость для деформирования материалов с высокими пластическими деформациями. Этот процесс состоит из пошаговой штамповки с последующим угловым прессованием (или поперечным выдавливанием). Таким образом, он сочетает в себе некоторые из основных преимуществ методов равноканального углового прессования и многонаправленнойковки для повышения степени деформации и увеличения однородности деформации заготовки после нескольких проходов. В данном методе сочетание выдающихся возможностей инкрементнойковки и характеристик сдвига, связанных с угловым прессованием, может предоставить возможность для повышения жесткости объемной пластической деформации.

В настоящее время перед машиностроением стоит задача повышения эффективности производства и качества получаемых изделий. Растущая потребность в производстве сложнопрофильных осесимметричных деталей определяет необходимость совершенствования методов их изготовления. Вместе с традиционными методами изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей механической обработкой и многооперационной вы-

тяжкой за последние годы широкое применение находит ротационная вытяжка на специализированном оборудовании с использованием в качестве деформирующих элементов роликов [14]. Изучение процесса ротационной вытяжки с утонением осложняется наличием локальной деформации и объемным характером состояния материала в пластической области, а также анизотропией механических свойств материала трубной заготовки.

Существует инновационный метод формирования утонения – трехвалковая косая прокатка. Трехвалковая косая прокатка – это процесс пластической деформации, при котором три валка расположены друг относительно друга под углом  $120^\circ$  по окружности в направлении вращения, что дает заготовке ради-

альное сжатие и осевое растяжение. Принцип трехвалковой косой прокатки показана на рис. 11.

Косая прокатка – это метод уменьшения диаметра круглой заготовки. В этом процессе нагретая круглая заготовка вращается и продвигается с помощью валков, поскольку оси валков смещены относительно линии прокатки.

На рис. 12 представлена принципиальная схема трехвалкового стана косой прокатки.

Этот прокатный стан оснащен валками, расположенными с интервалом по окружности  $120^\circ$  вокруг заготовки, а оси валков смещены относительно линии прокатки. Валки вращаются в одном направлении с постоянной скоростью вращения.

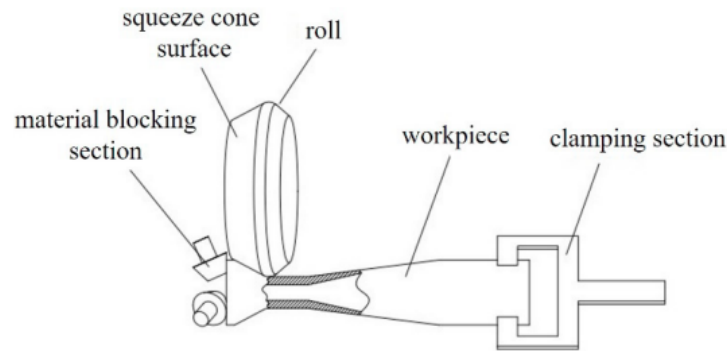


Рис. 11. Схема трехвалковой косой прокатки

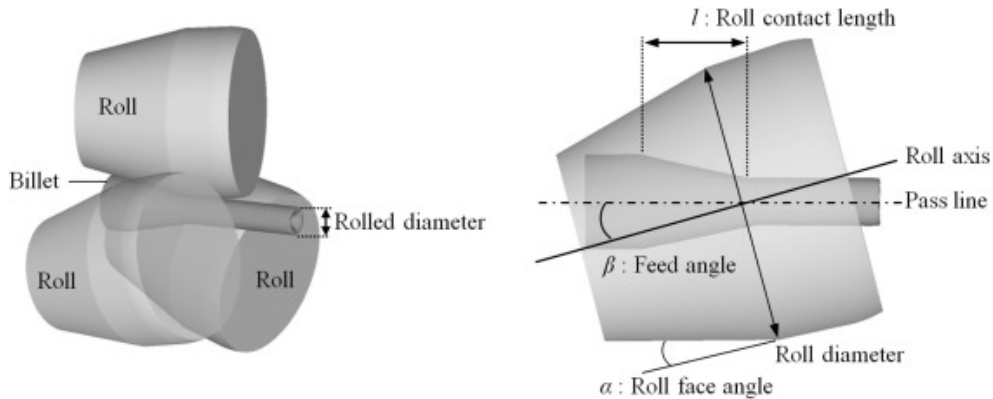


Рис. 12. Схема трехвалковой косой прокатки

Косая прокатка широко используется в промышленности для производства труб, цилиндрических прутков и шаров. Этот процесс выполняется с использованием двух или трех валков (бочкообразных или конических), которые установлены под углом к центральной линии заготовки (цилиндрический стержень). Несмотря на то, что косая прокатка используется уже более века, этот метод формования

настолько сложен, что на сегодняшний день ни одно исследование не рассматривало его всесторонне, особенно с точки зрения возникновения внутренних трещин.

В последние годы было предложено использовать технику косой прокатки для изготовления ступенчатых осей и валов. Этот метод требует использования прокатных станков, позволяющих численное управление расстоя-



нием. Данный метод предлагает множество преимуществ, в том числе: высокую эффективность производства; снижение расхода материала; улучшенные прочностные свойства; экологичность; снижение энергопотребления и автоматизацию процессов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демин, В.А. Инновационные технологии в обработке металлов давлением для транспортного машиностроения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №8 (98). – С. 3-7.
2. Забельян, Д.М., Бурлаков, И.А., Гордин, Д.Э., Мангасарян, Г.А., Гладков, Ю.А. Исследование влияния технологических режимов термосверления отверстий в изделиях из труднодеформируемых материалов на износ инструмента // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2020. – №1. – С. 83-90.
3. Бурлаков, И.А., Забельян, Д.М., Гордин, Д.Э. Изготовление отверстий в заготовках из жаропрочного титанового сплава VT20 методом термического сверления // Машиностроение и инженерное образование. – 2018. – №2. – С. 17-21.
4. Галкин, С.П., Стебунов, С.А., Алешенко, А.С., Власов, А.В., Патрин, П.В., Фомин, А.В. Моделирование и экспериментальная оценка условий кольцевого разрушения при горячей радиально-сдвиговой прокатке // Металлург. – 2020. – №3. – С. 64-70.
5. Allenov, M.G., Belokurov, O.A. Evaluation of the friction factor influence on the results of cross-wedge rolling simulation in Qform software // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – PP. 494-500.
6. Демин, В.А., Рыжкова, А.А. Влияние механической, физической и геометрической неоднородности заготовки на параметры вытяжки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – №10. – С. 418-423.
7. Demin, V.A., Larin, S.N., Riskin, R.V., Rizkova, A.A. Study the influence of anisotropy on the drawing cylindrical part // CIS Iron and Steel Review. – 2018. – №16. – PP. 25-28.
8. Gu, B., Han, X., Hua, L. Processing design and optimization on rotary forging of thin-walled structure // Thin-Walled Structures. – 2021. – Vol. 162. – Article Number 107567.
9. Xin Liu, Chun Dong Zhu, Shao Dong Sun, Rong Fei Ma Rotary forging with multi-cone rolls // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 56. – PP. 656-666.
10. Xian-bin, Fua Shu Miao, Yu-cun Zhang, Qun Li, Tao Kong, Gui-ru Zhang A new method of processing laser scanning data of radial section dimensions for ring forgings // Measurement. – 2020. – Vol. 153. – Article Number 107430.
11. Shanyue Guan, Xiaokai Wang, Lin Hua, Li Li Quantitative ultrasonic testing for near-surface defects of large ring forgings using feature extraction and GA-SVM // Applied Acoustics. – 2021. – Vol. 173. – Article Number 107714.
12. Camacho, A.M., Marin, M.M. Efficiency Analysis of Incremental Forging Processes on Flat Surfaces // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 132. – PP. 358-365.
13. Montazeri-Pour, M., Parsa, M.H., Jafarian, H.R., Taieban, S. Microstructural and mechanical properties of AA1100 aluminum processed by multi-axial incremental forging and shearing // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 639. – PP. 705-716.

14. Yamane, K., Shimoda, K., Kuroda, K., Kajikawa, S., Kuboki, T. A new ductile fracture criterion for skew rolling and its application to evaluate the effect of number of rolls // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 291. – Article Number 116989.

## REFERENCES

1. Dyomin, V.A. Innovation technologies in metal forming for transport mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.8 (98). – PP. 3-7.
2. Zabeliy, D.M., Burlakov, I.A., Gordin, D.E., Mangasaryan, G.A., Gladkov, Yu.A. Investigations of impact of technological modes at hole thermo-drilling in hard-to-deform products upon tool wear // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2020. – No.1. – PP. 83-90.
3. Burlakov, I.A., Zabeliy, D.M., Gordin, D.E. Manufacturing holes in heat-resistant VT20 titanium alloy billets through thermal drilling // *Mechanical Engineering and Engineering Education*. – 2018. – No.2. – PP. 17-21.
4. Galkin, S.P., Stebunov, S.A., Aleshchenko, A.S., Vlasov, A.V., Patrin, P.V., Fomin, A.V. Modeling and experimental estimate of ring destruction conditions at hot radial-shear rolling // *Metallurgist*. – 2020. – No.3. – PP. 64-70.
5. Allenov, M.G., Belokurov, O.A. Evaluation of the friction factor influence on the results of cross-wedge rolling simulation in Qform software // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – PP. 494-500.
6. Demin V. A., Ryzhkova A. A. Effect of mechanical, physical and geometric inhomogeneity of blank on the deep drawing parameters // *Proceedings of the Tula State University. Technical sciences*. – 2020. – №10. – PP. 418-423.
7. Demin, V.A., Larin, S.N., Riskin, R.V., Rizkova, A.A. Study the influence of anisotropy on the drawing cylindrical part // *CIS Iron and Steel Review*. – 2018. – №16. – PP. 25-28.
8. Gu, B., Han, X., Hua, L. Processing design and optimization on rotary forging of thin-walled structure // *Thin-Walled Structures*. – 2021. – Vol. 162. – Article Number 107567.
9. Xin Liu, Chun Dong Zhu, Shao Dong Sun, Rong Fei Ma Rotary forging with multi-cone rolls // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 56. – PP. 656-666.
10. Xian-bin, Fua Shu Miao, Yu-cun Zhang, Qun Li, Tao Kong, Gui-ru Zhang A new method of processing laser scanning data of radial section dimensions for ring forgings // *Measurement*. – 2020. – Vol. 153. – Article Number 107430.
11. Shanyue Guan, Xiaokai Wang, Lin Hua, Li Li Quantitative ultrasonic testing for near-surface defects of large ring forgings using feature extraction and GA-SVM // *Applied Acoustics*. – 2021. – Vol. 173. – Article Number 107714.
12. Camacho, A.M., Marin, M.M. Efficiency Analysis of Incremental Forging Processes on Flat Surfaces // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 132. – PP. 358-365.
13. Montazeri-Pour, M., Parsa, M.H., Jafarian, H.R., Taieban, S. Microstructural and mechanical properties of AA1100 aluminum processed by multi-axial incremental forging and shearing // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 639. – PP. 705-716.
14. Yamane, K., Shimoda, K., Kuroda, K., Kajikawa, S., Kuboki, T. A new ductile fracture criterion for skew rolling and its application to evaluate the effect of number of rolls // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 291. – Article Number 116989.

Рецензент д.т.н.  
Владислав Юрьевич Лавриненко