

УДК 621.73

Моделирование вскрытия осевой полости при поперечно - клиновой прокатке свинца в QForm

Алленов Максим Геннадьевич^(*)allenov@bmstu.ru
SPIN-код: 9446-7519

Шитиков Андрей Андреевич

saw@bmstu.ru
SPIN-код: 5097-1841

Белокуров Олег Александрович

oabelokurov@bmstu.ru
SPIN-код: 9696-9659

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Вскрытие осевой полости или эффект Маннесмана (ЭМ) был впервые обнаружены при производстве бесшовных труб с помощью винтовой или непрерывной прокатки. Этот эффект описывает образование осевых полостей в заготовках и поковках, подвергнутых радиальному сжатию, из-за вторичных растягивающих напряжений, возникающих в центре материала. ЭМ представляет значительные трудности в таких процессах, как поперечно-клиновая прокатка (ПКП), винтовая прокатка и ротационная ковка круглых заготовок. В данном исследовании ЭМ изучается с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в коммерческом программном комплексе QForm. Для прогнозирования исчерпания ресурса пластичности заготовки применяется модифицированная модель Леметра. В работе дана оценка влияния геометрических параметров инструментов для ПКП на максимальную накопленную поврежденность для свинцовых заготовок.

Ключевые слова: вскрытие осевой полости, эффект Маннесмана, критерий поврежденности, поперечно-клиновая прокатка, метод конечных элементов, QForm, моделирование

Simulation of axial crack formation during cross-wedge rolling in QForm

Allenov Maksim Gennadevich^(*)allenov@bmstu.ru
SPIN-code: 9446-7519

Shitikov Andrei Andreevich

saw@bmstu.ru
SPIN-code: 5097-1841

Belokurov Oleg Aleksandrovich

oabelokurov@bmstu.ru
SPIN-code: 9696-9659

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Axial cracking, known as the Mannesmann effect (ME), was first observed during seamless tube production via helical or continuous rolling processes. This phenomenon involves the formation of axial cracks or discontinuities within billets and forgings subjected to radial deformation, resulting from secondary tensile stresses arising at the billet center. The Mannesmann effect poses significant challenges in metal forming operations such as cross-

wedge rolling (CWR), helical rolling, and rotary forging of cylindrical billets. In this study, the ME is investigated through finite element method (FEM) using the commercial software package QForm. A modified Lemaitre damage model is employed to predict the ductile fracture initiation within the workpiece. The research assesses the impact of geometric parameters of the CWR tools on the maximum accumulated damage in lead billets.

Keywords: axial cracking, Mannesmann effect, damage criterion, cross-wedge rolling, finite element method, QForm, numerical simulation

Введение. Вскрытие осевой полости — дефект, который заключается в образовании полостей вдоль продольной оси в стержнях и поковках, подвергнутых радиальному сжатию во время обработки давлением [1]. Полости образуются из-за вторичных растягивающих напряжений, возникающих в центре поковки из-за сильной неоднородности деформации поперечного сечения. Также данный дефект называется эффект Маннесмана (ЭМ). ЭМ может возникать как при холодной, так и при горячей деформации и является одним из самых серьезных ограничений в таких процессах, как поперечно-клиновое прокатка, накатка зубчатых колес и ротационная ковка круглых поковок [2]. Для исследования условий возникновения ЭМ и разработки методов его предотвращения широко применяется физическое моделирование с использованием свинца в качестве моделирующего материала [3, 4]. Использование свинца обусловлено его способностью при комнатной температуре имитировать пластическое поведение стали при высоких температурах горячей деформации (температурное подобие) и значительно меньшими требуемыми усилиями деформации, что упрощает и удешевляет эксперименты. В работе проводится математическое моделирование данного материала для дальнейшего сопоставления с экспериментом.

Материалы и методы. Математическая модель процесса поперечно-клиновой прокатки. Значительный вклад в понимание и моделирование эффекта Маннесмана внесли Ghiotti et al. [5], которые предложили новый закон повреждения, учитывающий предшествующие дефекты материала. Их модель позволяет точно прогнозировать места разрушения при внешней нагрузке и дает представление о времени образования трещин. Применение этой модели к операции ротационного прошивания труб продемонстрировало ее эффективность при моделировании процесса при повышенных температурах.

При этом для выявления таких дефектов современным методом исследования является моделирование с использованием МКЭ. Предыдущие исследования ПКП [6–8] также показали, что моделирование в QForm может помочь выявить множество дефектов формы. Однако этот подход не позволил обнаружить внутренние дефекты.

В программе создана модель процесса ПКП с двумя инструментами и круглой заготовкой. Материал заготовки выбран из базы данных QForm (холодный свинец). Трение использовали как стандартное Unlubricated с увеличенным фактором трения, равным 1. Сетка КЭ генерировали с настройками по умолчанию. В QForm используется понятие адаптация сетки КЭ для

уменьшения или увеличение ее размера. Адаптация — это относительная величина, которая вычисляется в узлах сетки и которая обратно пропорциональна величине размеров элементов, относящихся к этим узлам. Чем больше адаптация в узле, тем меньше элементы, относящиеся к этому узлу, и наоборот. При стандартной адаптации для данной заготовки (диаметр 26 мм) средний размер сетки КЭ на 1 шаге расчета — 3,7 мм. При адаптации 2,0–2,7 мм.

Анализируя векторы скорости и сетки МКЭ, можно заметить, что из-за оптимизации и алгоритмов, используемых в QForm для генерации сетки МКЭ, сетка в центральной области становится относительно грубой. Это сглаживает разницу в скоростях и не позволяет точно проанализировать их влияние на возможное расслоение (рис. 1). Кроме того, скорость вращения заготовки влияет на формирование направленной волокнистой структуры, что важно для производства высококачественных поковок с улучшенными механическими свойствами.

Для более точного учета этого эффекта сетка была уменьшена на 50 % относительно создаваемой с параметрами по умолчанию, увеличены настройки адаптации для поковки в QForm.

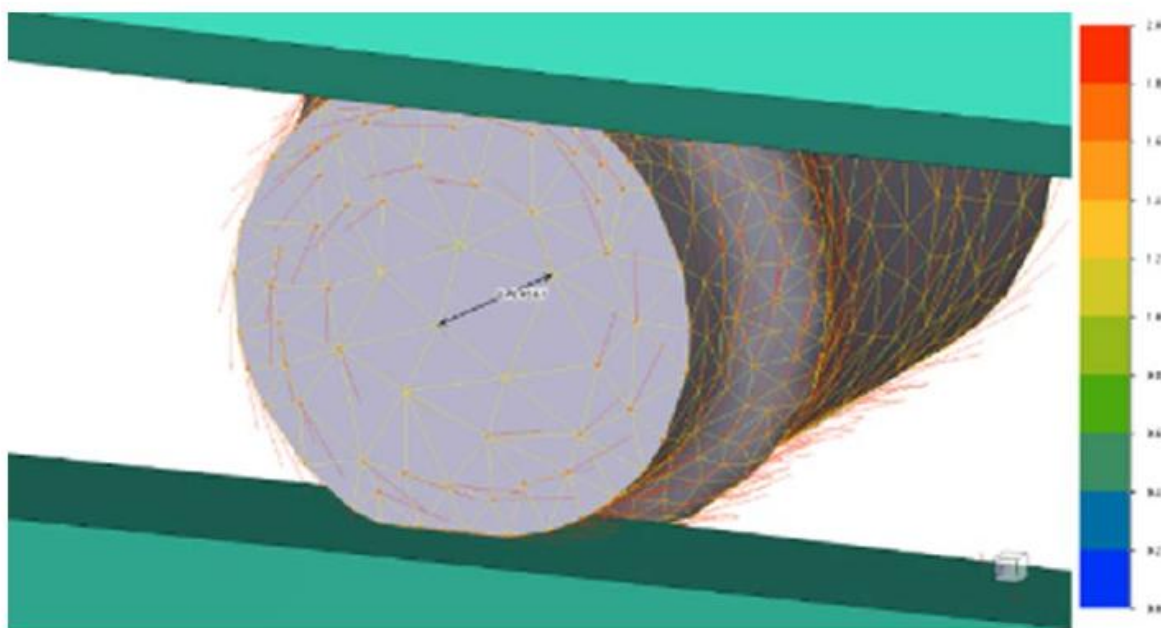


Рис. 1. Векторы скоростей узлов (мм/с) для ПКП с настройками стандартной сетки МКЭ

Путем корректировки параметров сетки МКЭ и условий трения выбраны оптимальные настройки для моделирования ЭМ. Размер сетки КЭ должен быть уменьшен в 2 или более раза в центре заготовки. Фактор трения (используется трение по закону Леванова) установлен на уровне 2 или выше [9]. Это происходит из-за особенностей расчета с помощью МКЭ, так как при факторе трения 1 все еще присутствует проскальзывание

Подпрограмма моделирования эффекта Маннессмана. В МГТУ им. Н.Э. Баумана авторами была разработана пользовательская подпрограмма на

языке Lua, основанная на работе Ghiotti et al. [5], для расчета эффекта Маннесмана в QForm.

Исследование [5] рассматривает модифицированную формулу расчета поврежденности материала заготовки при пластическом деформировании, основанную на модели Леметра, с включением дополнительного влияния жесткости напряженного состояния. Модификация модели Леметра позволяет более точно моделировать повреждения, особенно за счет различия условий растягивающего и сжимающего напряжения. Более того, включение экспериментально определенных параметров позволяет адаптировать модель для конкретных материалов, что делает ее применимой для широкого круга инженерных задач, включая прогнозирование разрушения и оптимизацию процессов.

Качественная оценка влияния геометрических параметров на критерий повреждения. Геометрия клина и заготовки описывается следующими параметрами (рис. 2): α — угол наклона боковой поверхности клина; β — угол заострения клина; s — ширина шейки; D — диаметр исходной заготовки; d — диаметр шейки. Отношение $D/d = \delta$ — коэффициент обжима.

Проведено 9 моделирований с указанными выше параметрами. Использовали материал — холодный свинец (Pb cold) из базы данных QForm. После моделирования выполнена подпрограмма для ЭМ и была рассчитана накопленная поврежденность. Результаты моделирования и геометрические параметры клиньев сведены в таблицу. Модель процесса и параметры геометрии взяты из предыдущего исследования [9].

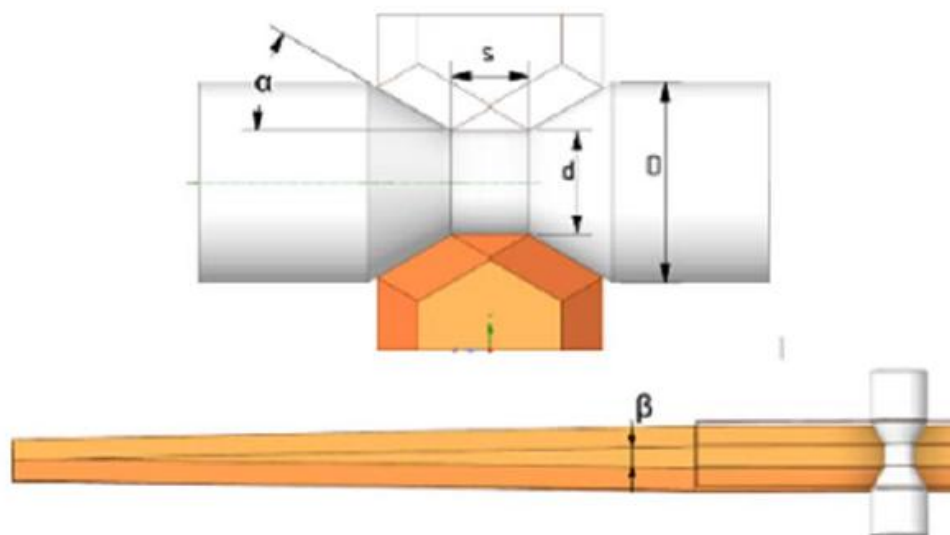


Рис. 2. Геометрические параметры клина и поковки

Значения критерия повреждения **Обсуждение полученных результатов.** Увеличение α приводит к уменьшению повреждения, что указывает на обратную зависимость между α и повреждением. Влияние β зависит от значения α . Наиболее значимым фактором, влияющим на вероятность разрушения

(ЭМ), является угол наклона клина α . Увеличение α значительно снижает повреждение. Угол заострения клина β также влияет на повреждение, но его эффект зависит от α .

После расчета подпрограммой ЭМ

№	Параметры	Damage
1	$\alpha = 30^\circ; \beta = 2^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	9,722
2	$\alpha = 40^\circ; \beta = 2^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	7,525
3	$\alpha = 50^\circ; \beta = 2^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	7,085
4	$\alpha = 30^\circ; \beta = 3^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	9,325
5	$\alpha = 40^\circ; \beta = 3^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	9,733
6	$\alpha = 50^\circ; \beta = 3^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	7,425
7	$\alpha = 30^\circ; \beta = 4^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	9,612
8	$\alpha = 40^\circ; \beta = 4^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	8,667
9	$\alpha = 50^\circ; \beta = 4^\circ; D = 26; \delta=1,2; d = 21,7; s = 10$	7,956

Закключение. С помощью математического моделирования МКЭ в пакете QForm возможно детально изучить процесс ПКП и обнаружить дефекты в виде осевых полостей или кольцеобразных трещин. Установлено, что геометрия, размерные параметры и векторы скоростей оказывают существенное влияние на образование дефектов ПКП. Геометрия клина и его адаптация к конкретным размерам заготовок играют ключевую роль в минимизации дефектов и повышении долговечности заготовок и деталей из них после ПКП. Меньший угол ($\alpha = 30^\circ$) увеличивает вероятность раскрытия осевой полости, что имеет важное значение при разработке процесса ПКП. Возникновение ЭМ может быть предсказано в QForm с помощью пользовательской подпрограммы расчета истощения ресурса пластичности по модифицированному критерию Леметра.

Список источников

- [1] Кожевникова Г.В. *Теория и практика поперечно-клиновой прокатки*. Минск, Белорусская наука, 2010, 291 с.
- [2] Алленов М.Г., Белокуров О.А. Моделирование технологического процесса поперечно-клиновой прокатки заготовки для горячей объемной штамповки коленчатого вала. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2016, № 4, с. 67–70.
- [3] Pater Z., Gontarz A., Weroński W. Cross rolling of parts with non-circular cross section. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2008, vol. 8, pp. 139–147. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60200-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60200-3)
- [4] Wójcik Ł., Pater Z., Bulzak T., Tomczak J. Physical Modeling of Cross Wedge Rolling Limitations. *Materials*, 2020, vol. 13 (4), art. no. 867. <https://doi.org/10.3390/ma13040867>

- [5] Ghiotti A., Fanini S., Bruschi S., Bariani P.F. Modelling of the Mannesmann effect. CIRP Annals — Manufacturing Technology, 2009, vol. 58, pp. 255–258. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.099>
- [6] Allenov M.G., Belokurov O.A., Allenov D.G. Experimental research steel grade “steel 45” to abrasion wear, depending on the exit angle macrostructure fibers on the contact surface. MATEC Web of Conferences. Sevastopol, EDP Sciences, 2017, vol. 129, art. no. 02025. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712902025>
- [7] Allenov M.G., Belokurov O.A., Allenov D.G., Hasanov B.D. The Use of Additive Technologies in the Study of the Process of Cross Wedge Rolling Workpiece for the Stamping of the Crankshaft. Key Engineering Materials, 2022, vol. 91, pp. 259–264. <https://doi.org/10.4028/p-k2sj1n>
- [8] Allenov M., Klyueva I., Belokurov O., Andryushchenko I. Model Selection and Dragging Parameters in Cross-Wedge Rolling. Key Engineering Materials, 2022, vol. 910, pp. 265–270. <https://doi.org/10.4028/p-3axx1m>
- [9] Allenov M.G., Belokurov O.A. Evaluation of the friction factor influence on the results of crosswedge rolling simulation in qform software. Solid State Phenomena, 2020, vol. 299, pp. 494–500. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.494>