

С.Н. Лежнев¹, А.Б. Найзабеков¹, Е.А. Панин², А.О. Толкушкин¹, Д.В. Куис³
¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан, sergey_legnev@mail.ru
²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
³Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АРМАТУРНОГО ВИНТОВОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация

В работе рассмотрены результаты моделирования нового совмещенного способа деформирования, включающего радиально-сдвиговую прокатку и последующую операцию выдавливания, позволяющего получать винтовой арматурный профиль из круглой заготовки. В ходе моделирования был проведен анализ параметров напряженно-деформированного состояния в зонах радиально-сдвиговой прокатки и формирования винтового профиля в матрице на поверхности и осевой части заготовки. Установлено, что наибольшие значения эквивалентной деформации достигаются при формировании винтового профиля в матрице, при этом после стадии радиально-сдвиговой прокатки по сечению наблюдается существенное градиентное распределение деформации, которое после деформирования в винтовой матрице становится более равномерным.

Ключевые слова: винтовая арматура, радиально-сдвиговая прокатка, выдавливание, моделирование.

Введение

Получение различных черных и цветных металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) и нано-кристаллической (НК) структурами и, соответственно, высоким уровнем механических свойств и эксплуатационных характеристик является одной из главных задач обработки металлов давлением уже не одно десятилетие. Одним из основных путей решения данной задачи является применение для обработки металлов давлением различных способов, реализующих в процессе деформирования интенсивную пластическую деформацию (ИПД) [1-3] за счет которой осуществляется равномерная интенсивная проработка литой структуры во всем объеме деформируемой заготовки. Но, к сожалению, использование большинства способов ИПД в реальном производстве металлоизделий затруднительно по ряду причин, в том числе и по причине того, что большинство из данных способов не позволяют обрабатывать длинномерные заготовки.

Альтернативным вариантом решения проблемы использования ИПД при обработке металлов давлением в промышленных условиях является разработка совмещенных способов обработки металлов давлением с реализацией в процессе деформирования ИПД. В настоящее время уже разработано целый ряд совмещенных процессов [4-7], которые позволяют обрабатывать длинномерные заготовки с достаточной степенью проработки литой структуры металла для получения в нем ультрамелкозернистой структуры. При этом многие из данных совмещенных способов деформирования позволяют получать в процессе их реализации не только полуфабрикаты, но и готовые изделия. Одной из последних таких разработок

является процесс, предложенный в работе [8], который совмещает редуцированную прокатку стержня круглого или квадратного поперечного сечения в квадратном калибре со скручиванием в формовочной матрице (скручивающем механизме). Данный совмещенный способ позволяет получать упрочненный арматурный профиль с градиентной ультрамелкозернистой структурой [9]. Несмотря на достаточно простую конструкцию и эффективную проработку исходной заготовки (за один цикл деформирования происходит развитие деформации от 0,8 в центральных слоях заготовки до 1,4 в поверхностных слоях), данный способ имеет существенный недостаток, связанный с его технологичностью. При переводе производства на сортament другого размера понадобится не только новая матрица, но и новая пара валков с калибром заданных размеров.

С целью повышения технологичности процесса получения упрочненного арматурного профиля, нами была предложена новая схема его формирования (Рисунок 1), включающая деформирование заготовки круглого поперечного сечения на стане радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и последующее скручивание заготовки в формовочной матрице специальной конструкции (аналогичной представленной в работе [8]). В данном случае при переналадке производства на новый типоразмер арматурного профиля понадобится установка лишь новой матрицы нужного диаметра, так как для деформирования заготовки другого диаметра на стане РСП необходимо просто свести или развести валки сводится лишь к изменению величины обжатия. Кроме этого, в данном случае будет идти более интенсивная проработка структуры металла, так как из работ [10-11] известно, что при радиально-сдвиговой прокатке, в очаге деформации реализуется схема напряженного состояния близкая к всестороннему сжатию с большими сдвиговыми деформациями, т.е. оптимальная для формирования УМЗ структуры.

Целью данной работы является компьютерное моделирование предложенного совмещенного способа получения арматурного профиля и всестороннее его изучение.

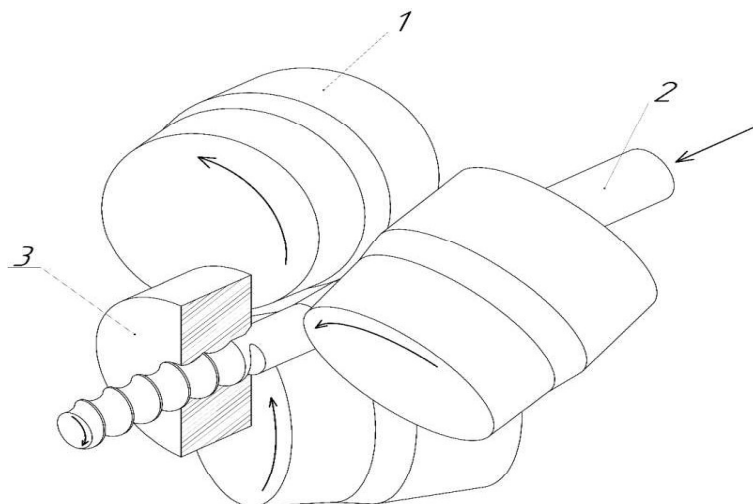


Рисунок 1 – Совмещенный способ получения арматурного профиля: 1 – прокатные валки, 2 – заготовка, 3 – матрица

Материалы и методы

При создании компьютерной модели нового совмещенного процесса, в качестве основного оборудования были использованы параметры стана радиально-сдвиговой прокатки 10-30. В качестве исходной заготовки был взят пруток диаметром

22 мм и длиной 120 мм. Раствор валков был установлен на получение заготовки диаметром 19 мм. В качестве материала заготовки была выбрана сталь AISI 1015, аналог стали 15.

В качестве рабочего инструмента обычно применяют специализированные программные комплексы, работающие на основе метода конечных элементов – Ansys, Deform, SimufactForming, Abaqus и многие другие. У каждого программного продукта имеются как свои достоинства, так и недостатки. Поэтому при выборе инструмента для работы необходимо учитывать такие факторы, как универсальность (возможность моделирования широкого диапазона задач), гибкость (возможность быстрой корректировки модели в случае неверно заданных начальных параметров), производительность (возможность расчета с высокой степенью точности при незначительных временных затратах). При анализе рассмотренных выше продуктов было решено использовать в качестве рабочего инструмента программный комплекс Deform, который полностью соответствует вышеописанным критериям.

При создании модели в программе Deform были приняты следующие допущения:

Материал заготовки является изотропным, в нем отсутствуют начальные деформации, несплошности, включения и т.д.;

Тип заготовки – пластичный, тип инструментов – жесткий;

На заготовку нанесена сетка из 85000 конечных элементов со средней длиной ребра элемента 1,3 мм;

Материал заготовки – сталь AISI 1015, соответствующая стали марки 15;

Начальная температура нагрева заготовки – 1100 °С;

Коэффициент теплопередачи между заготовкой и инструментом был принят равным 5 кВт/(м²·°С), как рекомендуемое значение программой Deform для процессов деформирования. Теплопередача между заготовкой и окружающей средой была активирована;

Скорость вращения валков была принята равной 100 об/мин;

На контакте заготовки и инструмента был установлен тип трения по Зибелю с коэффициентом трения 0,7 на валках и 0,1 в матрице;

Было задано 1000 шагов расчета с временным приростом 0,01 сек/шаг;

После расчета была получена модель совмещенного процесса, в котором заготовка сперва прокатывается на стане радиально-сдвиговой прокатки, при этом на выходе из очага деформации на поверхности заготовки образуется винтовая реборда (рисунок 2, а). При попадании в матрицу заготовка подвергается скручиванию вокруг продольной оси на угол, соответствующий конфигурации винтового канала (рисунок 2, б).

При этом реализуется достаточно полное заполнение винтового канала матрицы, что позволяет получить заданный профиль без возникновения заклинивания заготовки или ее распрессовки на входе в матрицу.

При изучении любого процесса обработки давлением одним из важнейших этапов является исследование напряженно-деформированного состояния. Это дает возможность оценить возникающие значения деформаций и напряжений, выявить места возникновения их критических значений, что, в свою очередь, позволяет проанализировать прочность инструмента, вероятность возникновения дефектов и т.д.

Учитывая тот факт, что разрабатываемый способ деформирования имеет достаточно сложную схему течения металла, которая меняется по мере продвижения

заготовки вдоль продольной оси, наиболее целесообразно рассматривать исследуемые параметры в продольном направлении заготовки в двух вариантах – на поверхности и в центральной части образца. Это позволит не только установить численные значения параметров НДС, но и оценить возникаемое градиентное распределение аккумулируемых факторов (эквивалентная деформация).

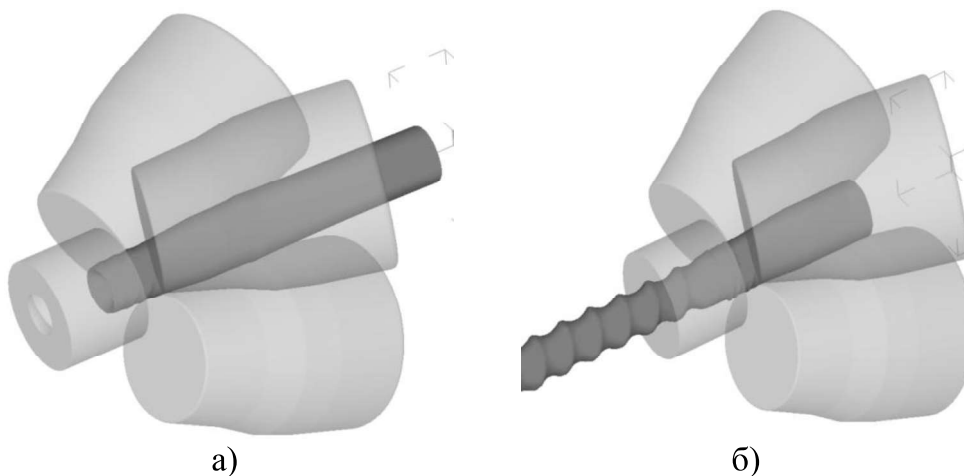


Рисунок 2 – Этапы деформирования

Результаты и обсуждение

Деформированное состояние

Для определения значений деформации необходимо находить значения компонентов соответствующего тензора, которые для трехмерного течения металла очень сложно визуализировать. Поэтому обычно при рассмотрении параметров НДС используют простой показатель интенсивности деформации, или так называемую эквивалентную деформацию, которая включает в себя компоненты деформации в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

При рассмотрении параметра «эквивалентная деформация» было установлено, что на стадии радиально-сдвиговой прокатки накопление данного параметра происходит преимущественно в поверхностных слоях заготовки (рисунок 3). После выхода из валков на поверхности уровень деформации достигает $6,75 \div 8,5$, постепенно снижаясь до 5 в периферийной зоне.

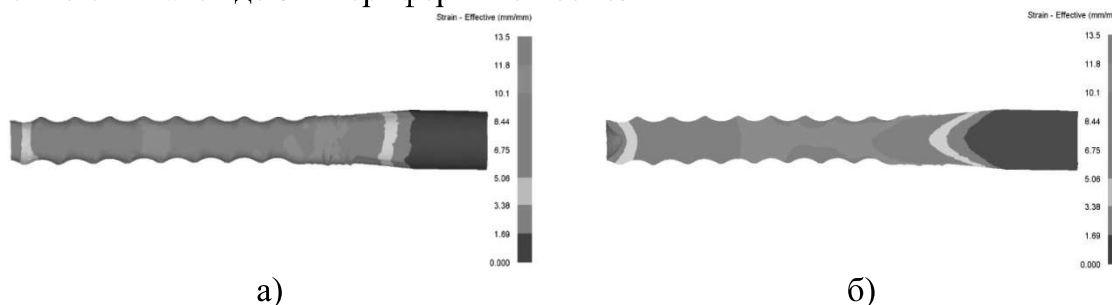


Рисунок 3– Распределение эквивалентной деформации на поверхности (а) и в центре заготовки (б)

При попадании в винтовой канал матрицы заготовка подвергается интенсивной деформации за счет скручивания. В результате происходит значительный прирост деформации по всему сечению заготовки. Так, в поверхностных слоях заготовки, которые приобретают объемную винтовую форму, величина деформации достигает 11,0, плавно снижаясь до 9,0 в периферийной зоне. Центральная зона на данной стадии деформирования прорабатывается максимально интенсивно – здесь величина деформации колеблется в диапазоне 8÷9. Причем, после прохождения винтового канала можно отметить существенное снижение разброса значений деформации.

Напряженное состояние

Для анализа напряженного состояния было рассмотрено среднее гидростатическое давление (рисунок 4).

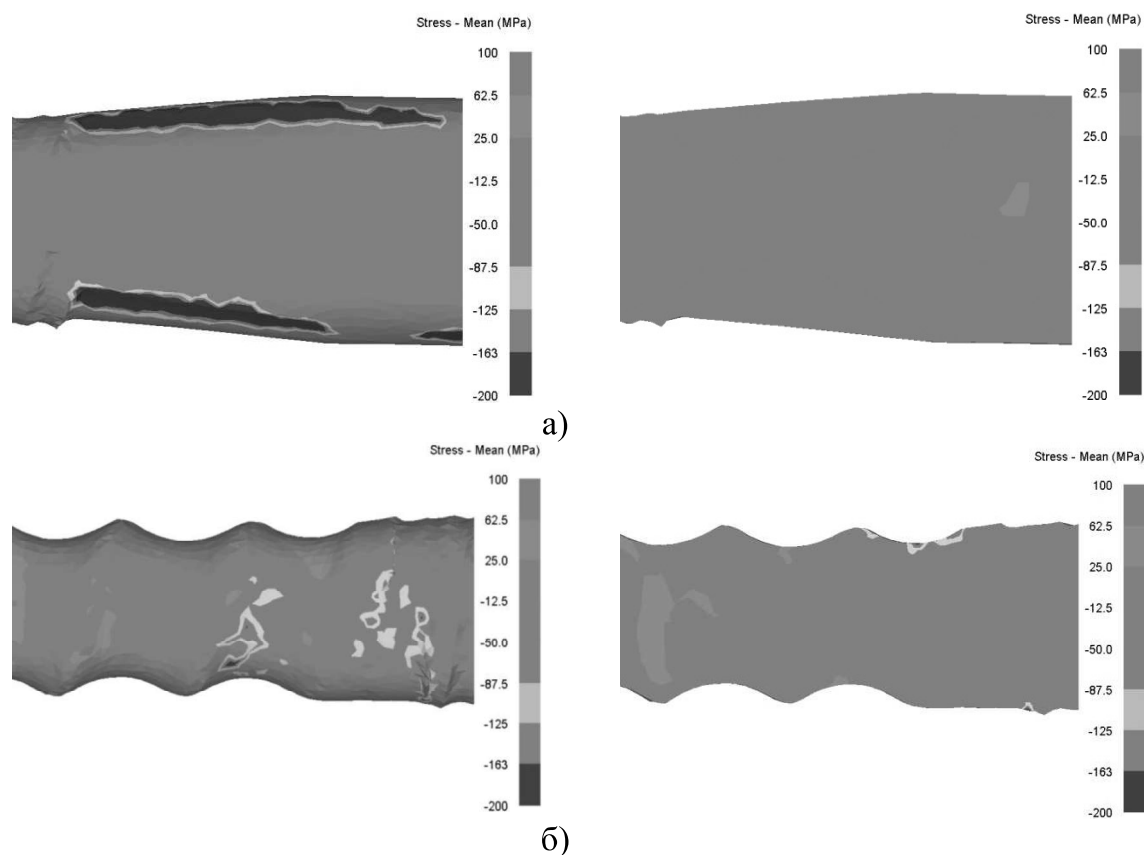


Рисунок 4 – Среднее гидростатическое давление на поверхности и в центре заготовки при радиально-сдвиговой прокатке (а) и формовке в матрице (б)

При радиально-сдвиговой прокатке (рисунок 4а) в зонах контакта металла с валками развиваются преимущественно сжимающие напряжения достигая величины - 200 МПа на поверхности и снижаясь до -12,5 ближе к центральной части заготовки. На свободных от контакта зонах величина данного параметра достигает -50 МПа. При формовке в матрице (Рисунок 4б) в первом витке развиваются сжимающие напряжения около -80 МПа в поверхностных слоях, подвергающихся формовке, и - 60÷-40 МПа в центральной части заготовки.

Выводы

В работе была поставлена задача моделирования совмещенного процесса радиально-сдвиговой прокатки – прессования для получения арматурного профиля из круглой заготовки. По результатам компьютерного моделирования был выполнен анализ параметров напряженно-деформированного состояния в зонах радиально-сдвиговой прокатки и формирования винтового профиля в матрице на поверхности и осевой частях заготовки. Максимальное значение эквивалентной деформации достигается при формировании винтового профиля на заготовке в матрице, что свидетельствует об интенсивной проработке начальной структуры заготовки. Также за счет сжимающих напряжений в матрице снижается неравномерность распределения эквивалентной деформации по диаметру заготовки в сравнении с зоной радиально-сдвиговой прокатки.

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14869135).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, H. Enhanced strength and ductility of nano-grained titanium processed by two-step severe plastic deformation / H. Wang, C. Ban, N. Zhao, Y. Kang, T. Qin, S. Liu, J. Cui. // *Mater. Lett.* - 2020. - V. 266. - №127485.
2. Jiang, S. Mechanisms of nanocrystallization and amorphization of NiTiNb shape memory alloy subjected to severe plastic deformation / S. Jiang, Z. Mao, Y. Zhang, L. Hu. // *Procedia Eng.* - 2017. - V. 207. - P. 1493-1498.
3. Wang, P. New insight for mechanical properties of metals processed by severe plastic deformation / P. Wang, Y. Xiang, X. Wang, Z. Liu, S. Qu, Z. Zhuang. // *Int. J. Plasticity.* - 2019. - V. 123. - P. 22-37.
4. Semenova, I.P. Enhanced fatigue properties of ultrafine-grained ti rods processed by ECAP-Conform / I.P. Semenova, A.V. Polyakov, G.I. Raab, R.Z. Valiev, T.C. Lowe. // *J. Mater. Sci.* - 2012. - V. 47. - № 22. - P. 7777-7781.
5. Naizabekov, A. Effect of combined rolling - ECAP on ultrafine-grained structure and properties in 6063 Al alloy / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina, A. Arbuz, T. Koinov, I. Mazur. // *J. Mater. Eng. Perform.* - 2019. - V. 28. - № 1. - P. 200-210.
6. Naizabekov, A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process / A. Naizabekov, I. Volokitina, S. Lezhnev, A. Arbuz, E. Panin, A. Volokitin. // *J. Mater. Eng. Perform.* - 2020. - V. 29. - № 1. - P. 315-329.
7. Muszka, K. Influence of strain path changes on microstructure inhomogeneity and mechanical behavior of wire drawing products / K. Muszka, M. Wielgus, J. Majta, K. Doniec, M. Stefanska-Kacziela. // *Mater. Sci. Forum.* - 2010. - V. 654-656. - P. 314-317.
8. Пат. 2640705 (Российская Федерация-Russian Federation) МКИ³В21В 1/16 Способ упрочнения и формирования винтового арматурного стержня / Г.И. Рааб, А.Г. Рааб; Уфимский государственный авиационный технический университет; Заявлено 20.12.2016; Опубл. 11.01.2018, Бюл. №2.
9. Raab, G.I. A new combined method of intensive plastic deformation with the formation of the screw profile of the rod / G.I. Raab, A.G. Raab. // *Machines. Technologies. Materials.* - 2018. - V. 12. - P. 320-322.

10. Валеев, И.Ш. Изменение микротвердости и микроструктуры меди М1 при радиально-сдвиговой прокатке / И.Ш. Валеев, А.Х. Валеева. // Письма о материалах. - 2013. - Т. 3. - № 1. - С. 38-40.

11. Naizabekov, A.B. Theeffectofcrossrollingon the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys / A.B. Naizabekov, S.N. Lezhnev, H. Dyja, T. Bajor, K.Tsay, A. Arbuz, N. Gusseyinov, R. Nemkaeva. // Metalurgija. - 2017. - V. 56. - P. 199-202.

S.N. Lezhnev¹, A.B. Naizabekov¹, E.A. Panin², A.O. Tolkushkin¹, D.V. Kuis³

¹Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, sergey_legnev@mail.ru

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

³Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

DEVELOPMENT AND COMPUTER MODELING OF A NEW COMBINED TECHNOLOGY FOR OBTAINING A REINFORCING SCREW PROFILE

Abstract

The paper considers the results of modeling a new combined deformation method, including radial-shear rolling and subsequent extrusion operation, which allows to obtain a screw reinforcement profile from a round billet. During the simulation, the parameters of the stress-strain state in the zones of radial-shear rolling and the formation of a screw profile in the matrix on the surface and axial part of the workpiece were analyzed. It is established that the highest values of equivalent strain are achieved during the formation of a screw profile in the matrix, while after the stage of radial-shear rolling along the cross section, a significant gradient distribution of strain is observed, which after deformation in the screw material becomes more uniform.

Keywords: screw reinforcement, radial shear rolling, extrusion, modeling.