

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.77
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177



ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. С применением адаптированной конечно-элементной модели процесса волочения биметаллической проволоки в монолитной волоке проведено аналитическое исследование влияния степени единичной деформации и рабочего угла волоки на изменение напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки в очаге деформации. В качестве основного инструмента исследования выбрана программа моделирования Deform-3d. Исходные данные для моделирования следующие: диаметр сталемедной заготовки 6,0 мм – толщина оболочки 0,5 мм, материал медь М1, сердечник диаметром 5,0 мм, материал сталь марки 50. Сердечник и оболочка принимались как пластические тела. Коэффициент трения между волокой и оболочкой постоянный, по закону Кулона равен 0,05. Взаимодействие оболочки и сердечника в свойствах инструмента Inter-ObjectDataDefinition задавалось как Stickingcondition, и при этом устанавливался параметр Separable для контроля возможного отслоения. В Deform-3d просчитано 9 вариантов волочения сталемедной проволоки диаметром 6,0 мм в волоках при значениях углов 2α , равных 12, 18 и 24 град, и вытяжках μ , равных 1,10, 1,20 и 1,30. Определяли напряжения волочения, среднее нормальное давление, поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева и Лоде-Надаи, изменение геометрических размеров оболочки и сердечника. Обоснованы деформационные режимы, обеспечивающие максимальную устойчивость процесса волочения. Показано, что предложенная модель учитывает все ранее полученные методом координатной сетки закономерности, но при этом значительно ускоряет и упрощает процесс расчета деформированного состояния, позволяет получать значения действующих на проволоку напряжений и проектировать фактический очаг деформации.

Ключевые слова: волочение, сталемедная проволока, моделирование, протяжка, угол волоки, обжатие, напряжения

© Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А., 2024

Для цитирования

Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSING THE STRESS AND STRAIN STATE OF STEEL-COPPER WIRE BASED ON MODELING OF DRAWING IN A MONOLITHIC DIE

Terentev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. An adapted finite element model of the process of drawing bimetallic wire in a monolithic die was used to conduct an analytical study on the influence of unit strain and the die reduction angle on the change in the stress and strain state of steel-copper wire in the deformation zone. DEFORM-3D simulation software was chosen as a main research tool. The initial data for modeling were chosen as follows: steel-copper workpiece diameter was 6.0 mm, shell thickness was 0.5 mm, the material was copper M1, core diameter was 5.0 mm and material was steel50. The core and the shell were taken as plastic bodies. The coefficient of friction between the die and the shell is constant, namely 0.05 according to Coulomb's law. The shell-core interaction in the Inter-Object Data Definition tool properties was set to Sticking Condition, and the Separable parameter was set to control possible delamination. DEFORM-3D calculates 9 options for drawing steel-copper wire with a diameter of 6.0 mm in dies at angles 2α of 12, 18 and 24 degrees and drawing ratio μ of 1.10, 1.20 and 1.30. The authors calculated drawing stresses, average normal pressure, Smirnov-Alyayev and Lode-Nadai stiffness coefficient distribution fields, and changes in the geometric dimensions of the shell and the core. The paper presents a rationale for deformation modes ensuring maximum stability of the drawing process. It has been shown that the proposed model factors into all the patterns previously determined by the coordinate grid method, but at the same time significantly speeds up and simplifies the process of calculating the strain state, providing the values of stresses acting on wire and design of the actual deformation zone.

Keywords: drawing, steel-copper wire, modeling, drawing, die reduction angle, reduction, stresses

For citation

Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A. Assessing the Stress and Strain State of Steel-Copper Wire Based on Modeling of Drawing in a Monolithic Die. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177>

Введение

Сталемедная проволока позволяет сочетать высокий уровень механических свойств сердечника с высокой электропроводностью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью, адгезионной способностью и широко используется в воздушных линиях связи, шахтных канатах, плетеных и тканых сетках и т.д. Ее востребованность в различных отраслях народного хозяйства постоянно возрастает, как и требования к ее качеству и эффективности производства. В общем случае сталемедная проволока относится к классу композитных материалов.

Основным способом изготовления сталемедной проволоки является волочение в монолитных волоках. Наряду с факторами, влияющими на режимы волочения стальной монометаллической проволоки, устойчивость процесса волочения биметаллической проволоки зависит от количественного соотношения и свойств составляющих компонентов, а также прочности их соединения на границе «оболочка-сердечник». Деформированное состояние сталемедной проволоки формируется по схеме МТМ (твердый сердечник – мягкая оболочка). При волочении происходит изменение отношения прочности сердечника и оболочки, значительно изменяются их пластические свойства. В результате этого возникает неравномер-

ность деформации составляющих биметаллической проволоки, что изменяет прочность их соединения и приводит к потере устойчивости пластической деформации материала оболочки или сердечника [1-5].

Обычно это связано с превышением допустимого значения усилия волочения. При этом наблюдается внеконтактная деформация, приводящая к вспучиванию лакирующей оболочки перед и после волоки, вызывает ее отслоение, разнотолщинность или нарушение сплошности покрытия [1-3].

Возникающая неоднородность деформации определяется величиной обжатия за проход, полуглом рабочего конуса волоки, прочностью связи граничных поверхностей сердечника, соотношением прочностных свойств сердечника и оболочки, условиями трения на границе волока-оболочка и отношением размеров сечения сердечника и оболочки. Неоднородность деформации при волочении из-за деформации сдвига устранить невозможно, но уменьшить ее размеры можно путем подбора подходящих параметров геометрии очага деформации и создания идеальных условий трения [1].

Кроме того, волочение характеризуется неблагоприятной разноименной схемой главных напряжений с преобладанием растягивающих напряжений в очаге деформации, особенно на выходе проволоки из

него. Растягивающие напряжения возникают также на контакте оболочка-волокна из-за сдерживающего действия силы трения, которая определяется величиной коэффициента трения и силы нормального давления.

Таким образом, устойчивость процесса волочения биметаллической проволоки во многом определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) проволоки как в очаге деформации, так и на входе и выходе из него. В связи со сложностью его определения экспериментальным путем большое практическое и теоретическое значение имеют математические и компьютерные модели процессов соединения разнородных материалов, позволяющие изучить влияние показателей НДС на прочность соединения в идеализированных условиях.

Целью данной работы является изучение НДС при волочении сталемедной проволоки в монолитных конических волокнах.

Материалы и методы исследования

Для анализа напряженно-деформированного состояния биметаллической проволоки за основу взяли разработанную в МГТУ им. Г.И. Носова модель волочения монометаллической проволоки [6-8].

Объектом исследования являлся процесс волочения сталемедной проволоки. В качестве основного инструмента исследования выбрана программа моделирования Deform-3d. Исходные данные для моделирования: диаметр заготовки 6,0 мм – толщина оболочки 0,5 мм, материал медь М1, сердечник диаметром 5,0 мм, материал сталь марки 50. В качестве кривой упрочнения стали марки 50 принята кривая упрочнения стали А533В из базы данных Deform-3d. Кривая упрочнения для меди взята из справочника [9]. Сердечник и оболочка принимались как пластические тела. Длина заготовки 40 мм. Коэффициент трения между волоком и оболочкой постоянный, по закону Кулона равен 0,05. Взаимодействие оболочки и сердечника в свойствах инструмента Inter-ObjectDataDefinition задавалось как Stickingcondition, и при этом устанавливался параметр Separable для контроля возможного отслоения. Скорость волочения 1 м/с. Геометрия волокна по ГОСТ 9453-75. При моделировании рассматривалась одна протяжка и менялись рабочие углы волок и вытяжка. Рабочие углы

Таблица 1. Усилие волочения при волочении сталемедной проволоки

Table 1. Drawing force when drawing steel-copper wire

	Рабочий полуугол волокна		
	6°	9°	12°
Вытяжка 1,10	Остановка моделирования	1,74 кН	1,91 кН
Вытяжка 1,20	2,12 кН	2,22 кН	2,28 кН
Вытяжка 1,30	Остановка моделирования	2,56 кН	2,77 кН

волок принимались $2\alpha = 12^\circ$, $2\alpha = 18^\circ$, и $2\alpha = 24^\circ$, а вытяжка 1,10, 1,20 и 1,30. Таким образом, чередуя для каждого угла различные вытяжки, было выполнено 9 расчетных экспериментов в Deform-3d. Сетка для деформируемых объектов задана в виде четырехгранника (или тетраэдра).

Поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова-Аляева определяли с помощью дополнительной подпрограммы для Deform-3d [6-8]:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;

$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – интенсивность нормальных напряжений.

Поля распределения показателя Лоде-Надаи определяли также с помощью дополнительной подпрограммы по формуле

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1.$$

Совокупность параметров η и μ_σ характеризует напряженное состояние при пластической деформации. Кроме того, являясь безразмерными, они позволяют сопоставлять напряженное состояние материалов с различным уровнем прочностных свойств. Значения показателя μ_σ изменяются от -1 до 1, причем $\mu_\sigma = -1$ соответствует линейному растяжению, $\mu_\sigma = 1$ соответствует линейному сжатию, $\mu_\sigma = 0$ соответствует чистому сдвигу. Показатель μ_σ определяет схему девиатора. При девиаторных схемах растяжения μ_σ изменяется в пределах $-1 \leq \mu_\sigma \leq 0$, при девиаторных схемах сжатия μ_σ изменяется в пределах $0 \leq \mu_\sigma \leq 1$, наконец, при девиаторной схеме сдвига $\mu_\sigma = 0$.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате моделирования были получены значения усилия волочения (табл. 1), оценено распределение среднего нормального давления на поверхности оболочки в очаге деформации (табл. 2) и получены поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева и Лоде-Надаи (табл. 3-5).

Таблица 2. Нормальное давление в очаге деформации
Table 2. Normal pressure in the deformation zone

	Рабочий полуугол волокни		
	6°	9°	12°
Вытяжка 1,10	Остановка моделирования	-432,0 МПа	-494,0 МПа
Вытяжка 1,20	-332,0 МПа	-391,0 МПа	-451,0 МПа
Вытяжка 1,30	Остановка моделирования	-368,0 МПа	-410,0 МПа

Таблица 3. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 6°
Table 3. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 6°

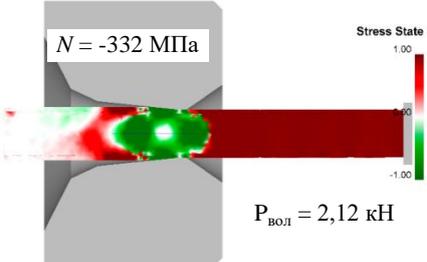
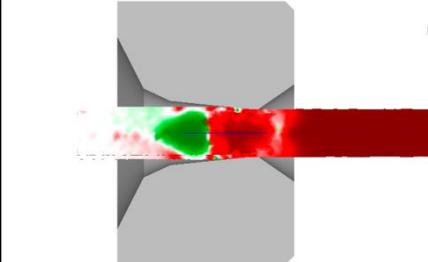
	Смирнов-Аляев	Лоде-Надаи
6°, вытяжка 1,10	Остановка моделирования	Остановка моделирования
6°, вытяжка 1,20		
6°, вытяжка 1,30	Остановка моделирования	Остановка моделирования

Таблица 4. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 9°
Table 4. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 9°

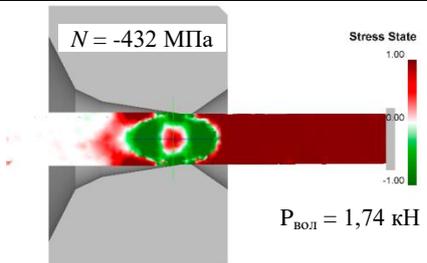
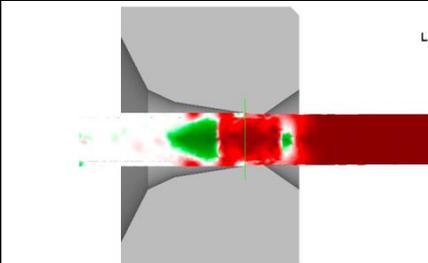
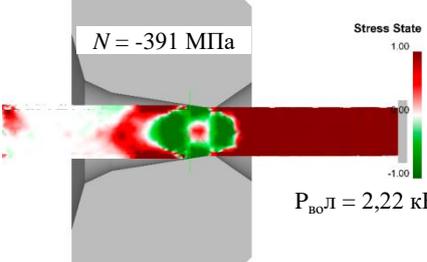
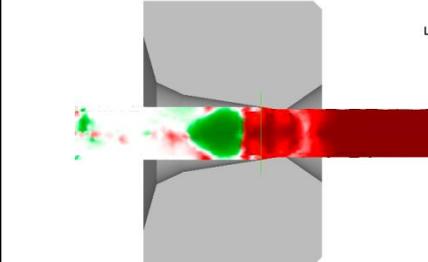
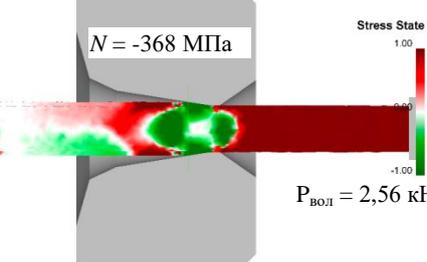
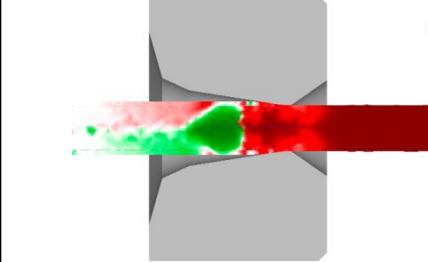
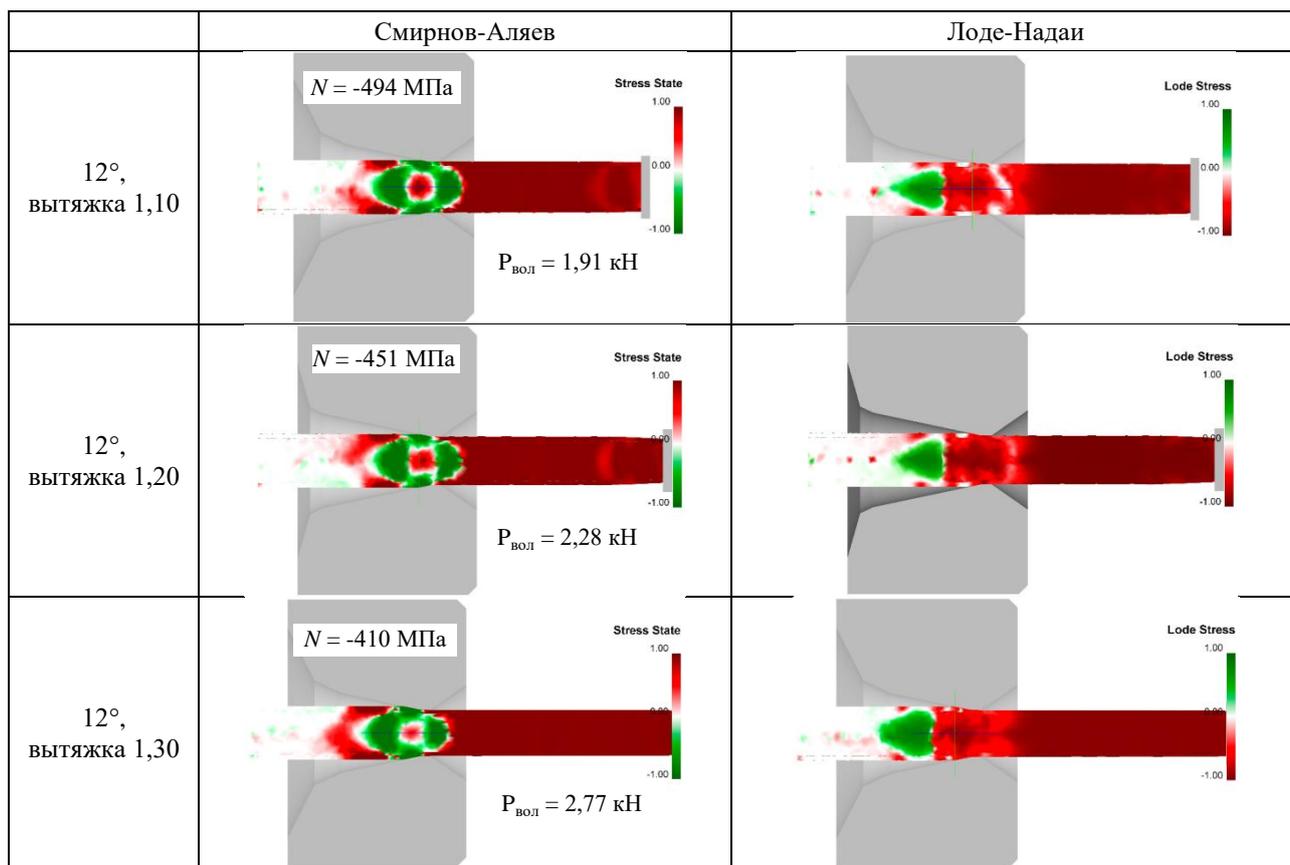
	Смирнов-Аляев	Лоде-Надаи
9°, вытяжка 1,10		
9°, вытяжка 1,20		
9°, вытяжка 1,30		

Таблица 5. Напряженное состояние проволоки и оболочки при рабочем полуугле волокни 12°
 Table 5. Stress state of the wire and the shell at a die reduction semi-angle of 12°



Процесс моделирования останавливался при значении рабочего полуугла 6° и вытяжках 1,10 и 1,30. Увеличение рабочего полуугла волокни до 9° делает процесс волочения стабильным. При малой вытяжке – 1,10 на оси проволоки в очаге деформации действуют растягивающие напряжения, так как коэффициент Смирнова-Аляева равен 1, при этом на поверхности оболочки нормальное давление -432 МПа. Увеличение вытяжки до 1,20 приводит к снижению растягивающих напряжений на оси проволоки и нормального давления на поверхности (-391 МПа), одновременно с этим идет увеличение значения усилия волочения (2,22 кН). При увеличении вытяжки до 1,30 тенденция сохраняется, при этом на оси проволоки растягивающие напряжения переходят в сдвиговые (коэффициент Смирнова-Аляева равен 0).

Увеличение рабочего полуугла волокни (до 12°) приводит к сокращению области растягивающих напряжений в оболочке до входа в очаг деформации. При этом на оси проволоки действует схема с растягивающими напряжениями при вытяжках 1,10, 1,20 и 1,30.

Изучение очагов деформации позволило установить некоторые особенности процесса волочения сталемедной проволоки. На продольном разрезе в Deform-3d были измерены основные геометрические размеры сердечника и оболочки. Установлено, что

оболочка имеет разную толщину, в зависимости от обжатия. С увеличением обжатия толщина оболочки уменьшается. Также установлено, что значение полуугла волокни не соответствует полууглу, при котором деформируется сердечник. На рисунке показано, что полуугол волокни 12°, но, проходя через очаг деформации, оболочка оказывает свое действие, и для сердечника полуугол становится меньше 12°. Так, при вытяжке 1,30 и полуугле волокни 12° на сердечник действует оболочка с полууглом 10,45°. Чем меньше обжатие, тем меньше полуугол действует на сердечник. Значения полууглов, действующих на сердечник, и толщина оболочки на выходе из очага деформации приведены в табл. 6.

Этим можно объяснить остановку процесса моделирования при вытяжках 1,10 и 1,30 и рабочем полуугле 6°. Малый полуугол (6°) и малая вытяжка (1,10) приводят к тому, что очаг деформации становится очень коротким, а значение полуугла в зоне контакта металл-оболочка равен 3,5°. При данных условиях практически все усилие волочения воспринимает оболочка, а сердечник практически не деформируется, что приводит к тому, что волокни стремится «содрачь» оболочку с проволоки. Происходит нарушение ее сплошности и процесс моделирования останавливается.

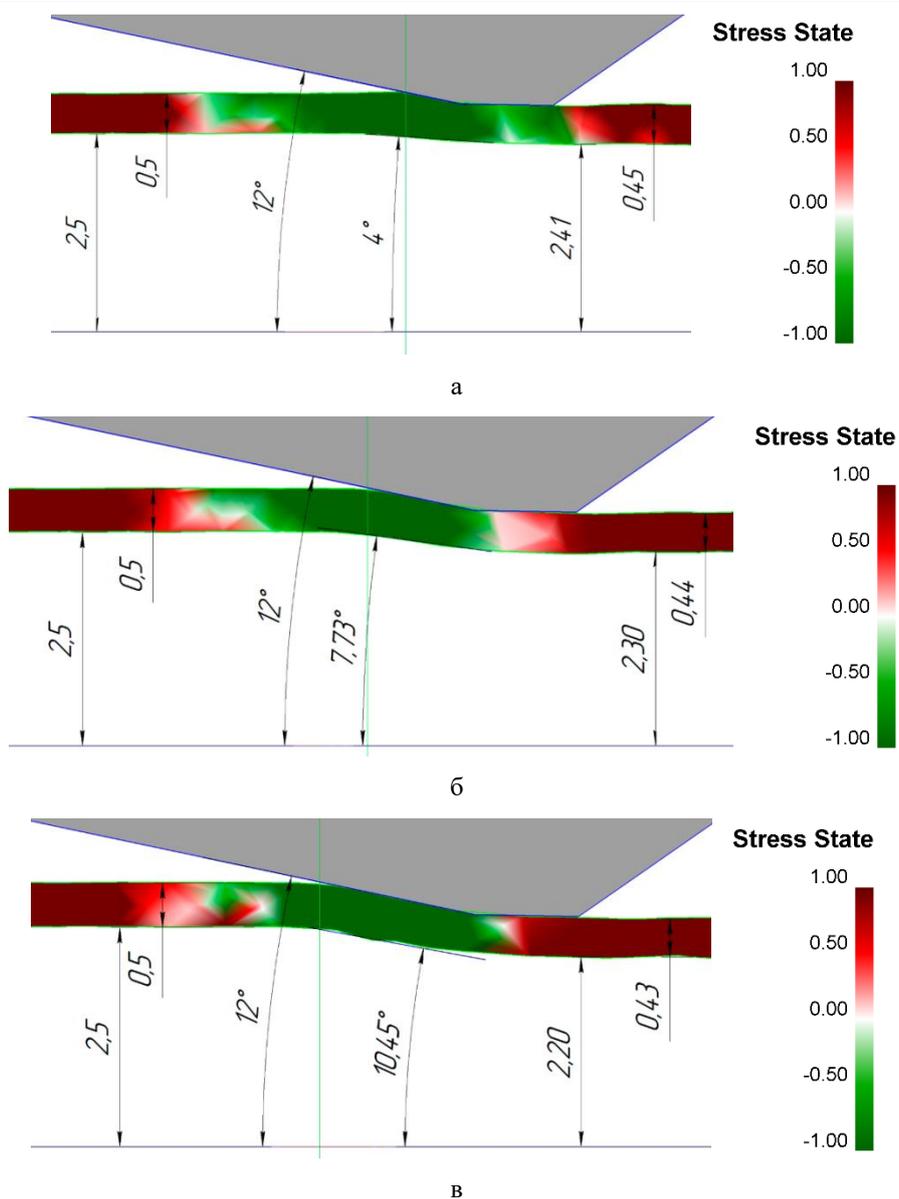


Рисунок. Напряженное состояние оболочки в очаге деформации и геометрические параметры (полуугол волоки 12°): а – вытяжка 1,10; б – вытяжка 1,20; в – вытяжка 1,30

Figure. Stress state of the shell in the deformation zone and geometric parameters (a die reduction semi-angle of 12°): a is a drawing ratio of 1.10; б is a drawing ratio of 1.20; в is a drawing ratio of 1.30

Таблица 6. Геометрические характеристики оболочки и сердечника

Table 6. Geometric characteristics of the shell and the core

Вытяжка	Полуугол волоки, град	Угол на границе сердечника и оболочки, град	Толщина оболочки после волочения, мм	Соотношение толщин оболочки (после волочения к исходной толщине)
1,10	6	3,5	–	–
1,20	6	5,6	0,47	0,94
1,30	6	4,8	–	–
1,10	9	3,6	0,47	0,95
1,20	9	7,9	0,46	0,91
1,30	9	8,9	0,43	0,85
1,10	12	4,0	0,45	0,90
1,20	12	7,7	0,44	0,88
1,30	12	10,45	0,43	0,86

При вытяжке 1,30 полуугол в зоне контакта металл-оболочка, действующий на сердечник, равен 5,8°. Сочетание малого угла и большой вытяжки способствует росту усилия волочения, коэффициент запаса при этом уменьшается и процесс моделирования останавливается.

Стоит отметить, что при полуугле 6° и вытяжке 1,20 процесс волочения в Deform-3d считается без каких-либо затруднений. В данном случае полуугол, действующий на сердечник, равен 5,6°.

Полученные при моделировании зависимости формоизменения оболочки и сердечника соответствуют зависимостям, полученным методом координатных сеток и используемым сегодня в практике [10]. Кроме того, разработанная модель процесса волочения биметаллической проволоки дает возможность более детального изучения очага деформации.

Заключение

Путем уточнения конечно-элементной математической модели волочения стальной проволоки в монолитной волоке получена модель волочения сталемедной проволоки в монолитной волоке.

Проведено компьютерное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке в зависимости от значений единичного обжата и рабочего угла волоки. Обоснован выбор рациональных режимов волочения, обеспечивающих высокую устойчивость процесса.

Показано, что разработанная модель обеспечивает реализацию закономерностей волочения биметаллической проволоки, полученных методом координатной сетки и используемых в практике волочения. При этом значительно ускоряется и упрощается процесс расчета, деформированного состояния, обеспечивается числовой расчет напряжений и возможность проектирования фактического очага деформации.

Список источников

1. Битков В.В. Анализ неоднородности деформации при волочении композитных прутков и проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №8. С. 21-27.
2. Салиханов Д.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния на границе между материалами при прокатке слоистого композита // Черные металлы. 2023. №9. С. 34-39.
3. Шумилин И.М. Условия устойчивого волочения биметаллической проволоки // Сталь. 1977. №12. С. 1124-1125.
4. Шеметова Е.С., Огарков Н.Н. Оценка длины контакта криволинейной волоки с деформируемым материалом с учетом ее упругой деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 38-40.

5. Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Определение осевых напряжений в материале оболочки на выходе из волоки методом верхней оценки // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2015. С. 9-15.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Анализ процесса волочения в монолитной волоке при моделировании в программном комплексе Deform-3d [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Электрон. текстовые дан. (172 Мб). Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018.
7. Методика совершенствования и проектирования маршрутов волочения проволоки / М.Ю. Усанов, В.А. Харитонов, Л.Э. Пыхов, Н.Ю. Сметнева // Сталь. 2018. №6. С. 42-43.
8. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Выбор способа волочения углеродистой проволоки // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2021. Т. 77. №11. С. 1177-1185.
9. Третьяков В.М., Зюзин В.И. Механические свойства сталей и сплавов: Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
10. Стальная проволока: монография / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.

References

1. Bitkov V.V. Analysis of strain non-uniformity in drawing composite rods and wire. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering]. 2010;(8):21-27. (In Russ.)
2. Salikhyanov D.R. Investigation of the stress-strain state at the boundary between materials during rolling of a layered composite. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(9):34-39. (In Russ.)
3. Shumilin I.M. Conditions of steady drawing of bimetalllic wire. *Stal* [Steel]. 1977;(12):1124-1125. (In Russ.)
4. Shemetova E.S., Ogarkov N.N. Assessing length of contact between a curved die and the deformed material factoring into elastic strain. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(2):38-40. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Shemetova E.S. An upper-bound method used to determine axial stresses in the shell material exiting the die. *Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Modern methods of design and technologies of metallurgical

- mechanical engineering: international collection of reports]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, pp. 9-15. (In Russ.)
6. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. *Analiz protsessy volocheniya v monolitnoy voloke pri modelirovaniy v programmnom komplekse Deform-3d: ucheb. posobie* [Analyzing a process of drawing in a monolithic die, using simulation in DEFORM-3D software suite: study guide]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018. (In Russ.)
 7. Usanov M.Yu., Kharitonov V.A., Pykhov L.E., Smetneva N.Yu. Techniques used to improve and design wire drawing routes. *Stal* [Steel]. 2018;(6):42-43. (In Russ.)
 8. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Choosing a method for carbon steel wire drawing. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii «Chernaya metallurgiya»* [Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information Ferrous Metallurgy]. 2021;77(11):1177-1185. (In Russ.)
 9. Tretyakov V.M., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva staley i splavov: Spravochnik* [Mechanical properties of steels and alloys: Handbook]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)
 10. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka: monografiya* [Steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 689 p. (In Russ.)

Поступила 20.12.2023; принята к публикации 26.01.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 20/12/2023; revised 26/01/2024; published 30/09/2024

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Шеметова Елена Сергеевна – старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

Dmitry V. Terentev – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dtnterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Mikhail Yu. Usanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Elena S. Shemetova – Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Veniamin A. Kharitonov – PhD (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110