

Анализ влияния технологических параметров на скорость деформации при экструзии проволоки*

Радионова Л.В., Громов Д.В., Лисовский Р.А.,
Фаизов С.Р., Хламкова С.С.
Московский политехнический университет
г. Москва, Российская Федерация
radionovalv@rambler.ru

Глебов Л.А.
Южно-Уральский государственный университет
(научно-исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты аналитических исследований методами компьютерного моделирования в пакете QForm влияния технологических параметров процесса экструзии проволоки диаметром 2,0 мм на скорость деформации по объему очага деформации. В ходе числовых экспериментальных исследований варьировалась скорость прессования на уровне 0,1; 0,5; 1,0; 3,0 и 5,0 мм/с. Проведенный анализ позволил установить, что в процессе экструзии проволоки диаметром 2,0 мм независимо от скорости прессования максимальные значения скорости деформации возникают на контакте сплава с матрицей во входной части рабочей зоны монолитной волоки. При изменении скорости прессования с 0,1 мм/с до 5,0 мм/с максимальные скорости деформации возрастают с 5 до 220 с⁻¹, т.е. в 44 раза, при этом характер распределения скоростей по сечению очага деформации сохраняется. Максимальная скорость деформации при экструзии может превышать двукратно среднюю скорость деформации. При экструзии на скорость деформации существенное влияние оказывает скорость прессования, коэффициент вытяжки и угол матрицы. Понимание фактически достижимых значений скорости деформации при экструзии проволоки позволяет грамотно сформулировать требования для проведения испытаний по определению реологических свойств малоизученных и новых сплавов.

Ключевые слова: экструзия, проволока, скорость прессования, скорость деформации, скорость истечения, QForm, численный эксперимент, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Проволоку наиболее часто ассоциируют с волочением в монолитной волоке и поперечным сечением “круг” [1]. Однако она может иметь различную геометрию – шестигранник [2], треугольник [3], овал и еще более сложный профиль. Для получения проволоки помимо монолитного волочения могут быть применены и другие процессы обработки металлов давлением и их сочетание – прокатка [4], экструзия (прессование) [5] или роликовое волочение [6].

На поведение сплавов в процессе пластической деформации как холодной, так и горячей существенное влияние оказывает скорость деформации [7-9]. Это связано с динамическим деформационным старением [10-12], наличие которого определяется скоростью деформации, и сопротивлением деформации [13-15], которое зависит не только от температуры, но также и скорости деформации. В связи с этим для построения кривых упрочнения и зависимостей сопротивления деформации сплавов необходимо

знать диапазон скоростей деформации, при которых металл обрабатывается.

Для процессов обработки металлов давлением характерен широкий диапазон скоростей деформации. Так, скорости деформации, которые достижимы на практике при волочении могут составлять от 10 до 12000 с⁻¹ [16]. Определяется их величина такими технологическими параметрами как скорость волочения, угол волоки и диаметр проволоки [17]. При прокатке разброс достигаемых скоростей деформации лежит в диапазоне от 0,1 до 1000 с⁻¹ [13,18]. В процессе прессования скорость деформации определяется коэффициентом вытяжки и скоростью прессования [19].

В теории обработки металлов давлением известны формулы, которые позволяют оценить скорость деформации [20]. Однако нужно отметить, что таким образом рассчитываются средние скорости. В то же время распределение скоростей деформации по сечению металла и по длине очага деформации может отличаться в несколько раз [17, 21].

Для анализа распределения скоростей деформации по сечению в процессах обработки металлов давлением применимы программы DEFORM-3D, ABAQUS, MSC-Software, Ansys LS-DYNA, QForm, в основе которых лежит метод конечных элементов [22-26].

Целью настоящей работы является анализ влияния технологических параметров на скорость деформации при экструзии проволоки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения скорости деформации при прямой экструзии численные эксперименты проводились в программе QForm 9.0.10 [26] (рис. 1).

Заготовку из сплава АМг6 диаметром 21,6 мм и длиной 43,0 мм подвергали экструзии через матрицу в виде монолитной волоки с полууглом $\alpha = 6^\circ$. Внутренний диаметр контейнера составлял $D_{вх} = 21,8$ мм. Диаметр готовой проволоки $D_{вых} = 2,0$ мм. Температура сплава при экструзии была 300°C. Коэффициент трения по Кулону был принят равным $f = 0,1$. В ходе числовых экспериментальных исследований варьировалась скорость прессования $V_{пр} = 0,1; 0,5; 1,0; 3,0$ и 5,0 мм/с. Технологические параметры экструзии проволоки диаметром 2,0 мм с разными скоростями прессования представлены в табл. 1.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10179 (Разработка научных и технологических основ получения проволоки из специальных сплавов для аддитивного производства). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (International Conference on Industrial Engineering), <https://icie-rus.org>

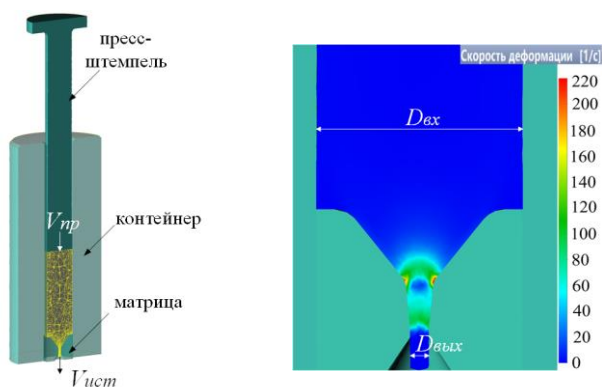


Рис.1. Компьютерное моделирование экструзии в программе QForm

Таблица 1

Технологические параметры экструзии проволоки 2,0 мм

Скорость прессования $V_{пр}$, мм/с	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0
Коэффициент вытяжки $\lambda = \frac{D_{вх}^2}{D_{вых}^2}$	118,8				
Скорость истечения $V_{ист} = V_{пр} \cdot \lambda$, мм/с	11,9	59,4	118,8	356,4	594,1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компьютерное моделирование позволяет определить изменение напряженно-деформированного состояния на различных стадиях пластической деформации. На рис. 2 показано изменение скорости деформации в процессе экструзии с момента заполнения матрицы сплавом и до выхода готовой проволоки из нее. Как можно видеть на рис. 2

максимальные скорости деформации возникают на контакте сплава с матрицей во входной части рабочей зоны монолитной волоки. Стоит отметить, что в работе [27] при прочностном анализе технологической оснастки для прямого прессования (экструзии) результаты расчета напряженно-деформированного состояния матрицы показали, что именно этот участок – перехода от входной к деформирующей зоне – является максимально нагруженным. При скорости прессования = 0,1 мм/с ($V_{ист} = 11,9$ мм/с) скорость деформации достигает 5 с^{-1} .

Увеличение скорости прессования приводит к повышению скорости деформации (рис. 3). При изменении скорости прессования с 0,1 мм/с до 5,0 мм/с максимальные скорости деформации возросли с 5 до 220 с^{-1} , т.е. в 44 раза. При этом характер распределения скоростей по сечению очага деформации сохраняется.

Как видно из рис. 2 и 3 максимальные скорости деформации формируются в сплаве, находящемся в матрице. С учетом этих значений визуально определить скорости деформации в металле, который находится в контейнере невозможно. Для того чтобы оценить распределение скоростей деформации в металле, который находится в контейнере шкала была ограничена значением $0,5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 4). Как видно на рис. 4 в процессе экструзии в контейнере имеются зоны застоя, которые формируются в углах контейнера. По мере заполнения матрицы на контакте металла со стенкой контейнера скорости деформации от «нулевых» повышаются до $0,35 \text{ с}^{-1}$. При этом в центре заготовки скорости деформации продолжают оставаться в диапазоне от $0,00$ до $0,10 \text{ с}^{-1}$. Повышение скорости прессования с 1 до 5 мм/с приводит к повышению скоростей деформации и у стенок контейнера (рис. 5) при этом в центре заготовки и в углах контейнера скорости даже в этом случае остаются близкими к 0 с^{-1} .

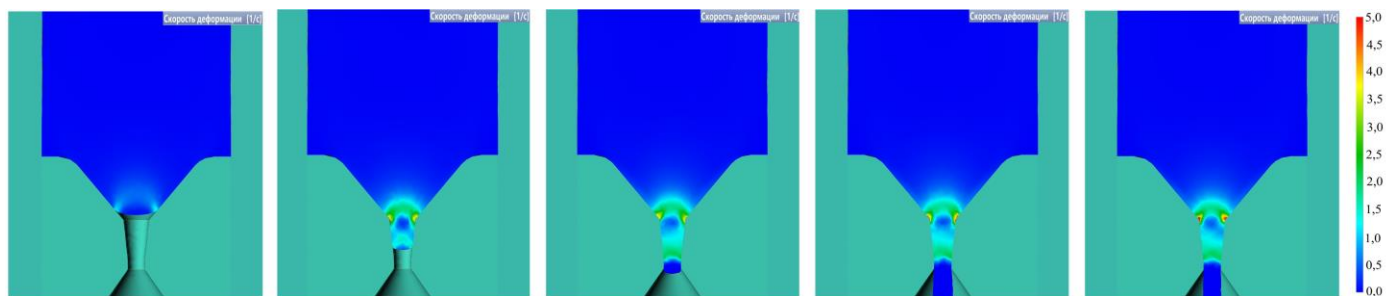


Рис. 2. Скорость деформации в процессе экструзии при скорости прессования $V_{пр} = 0,1$ мм/с

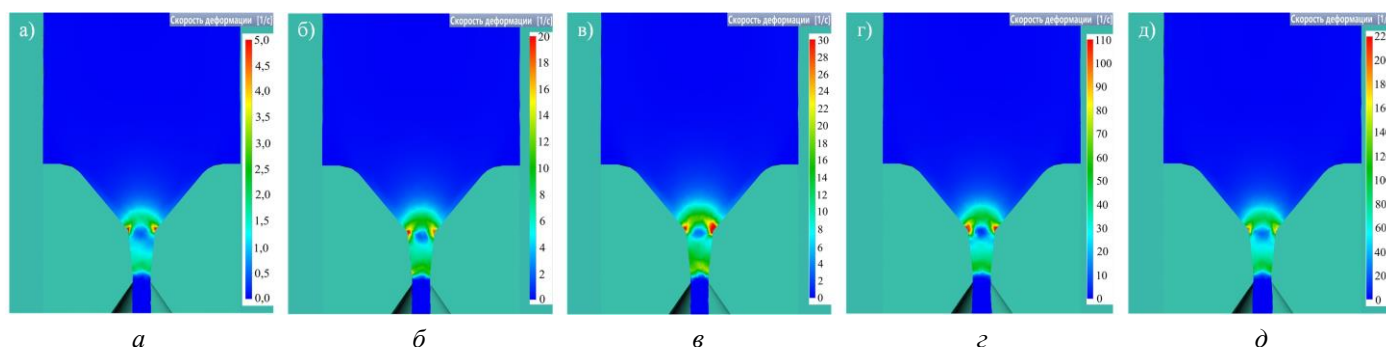


Рис. 3. Скорость деформации при скорости прессования $V_{пр}$:

а – 0,1; б – 0,5; в – 1,0; г – 3,0; д – 5,0 мм/с

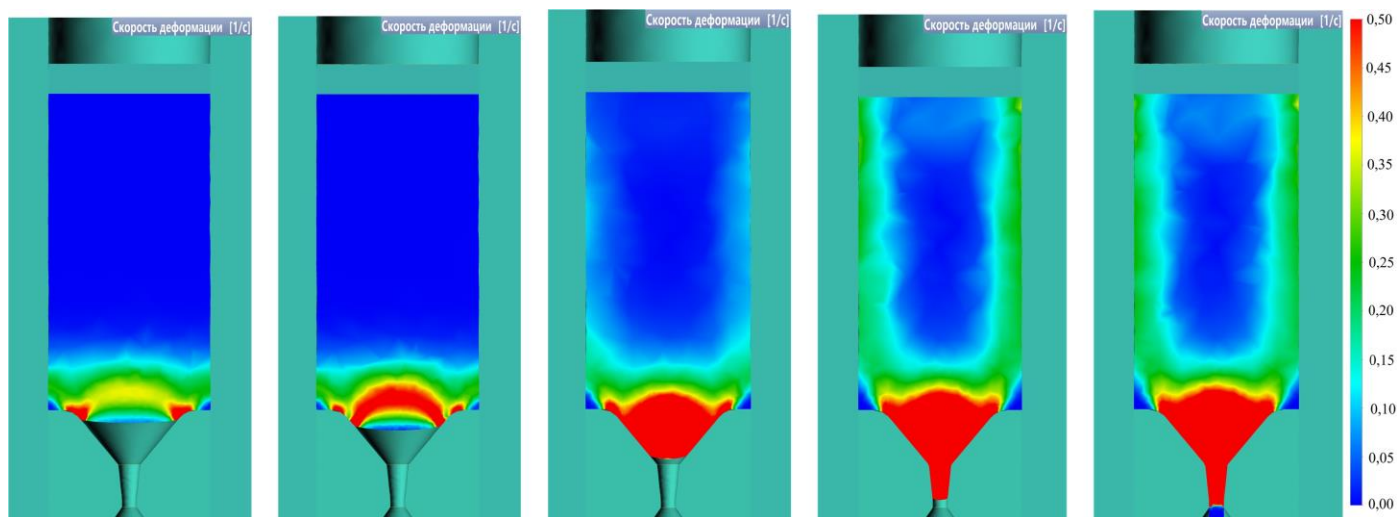


Рис. 4. Скорость деформации в процессе экструзии при скорости прессования $V_{np} = 1,0$ мм/с

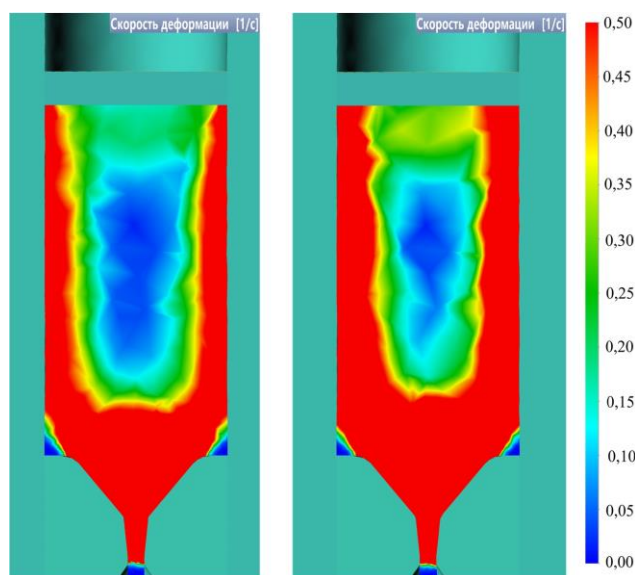


Рис. 5. Скорости деформации в контейнере при скорости прессования 3 и 5 мм/с

В практике производства алюминиевых сплавов типа АМг6 рекомендуется [19] скорость истечения 1-8 м/мин, т.е. 16-133 мм/с. С учетом нашего коэффициента вытяжки (табл.1) такие скорости истечения будут достигаться при скорости прессования 0,1-1,0 мм/с. Однако нужно отметить, что все эти рекомендации сделаны на основе практического опыта и расчетов средней скорости деформации. Поэтому целесообразно оценить средние скорости деформации для нашего случая и сравнить их с полученными при компьютерном моделировании.

Для оценки средней скорости деформации в работе [19] была приведена формула

$$\dot{\epsilon} = \frac{2V_{np}(\lambda - 1)tg\ 2\alpha}{D_{вх} - D_{вых}}$$

Согласно этой формуле на скорость деформации влияет геометрия очага деформации и скорость прессования.

Средние скорости деформации (табл. 2) отличаются от максимальных (рис. 3) более чем в 2 раза. Аналогичные

результаты были получены в работе [17] при анализе средних и максимальных скоростей деформации в процессе монолитного волочения.

Таблица 2

Результаты расчета средней скорости деформации при экструзии

Скорость истечения $V_{ист} = V_{np} \cdot \lambda$, мм/с	11,9	59,4	118,8	356,4	594,1
Средняя скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	1,6	8,2	16,4	49,1	81,8

Зависимость средней и максимальной скорости деформации от скорости прессования при неизменных геометрических параметрах очага деформации показана на рис. 6.

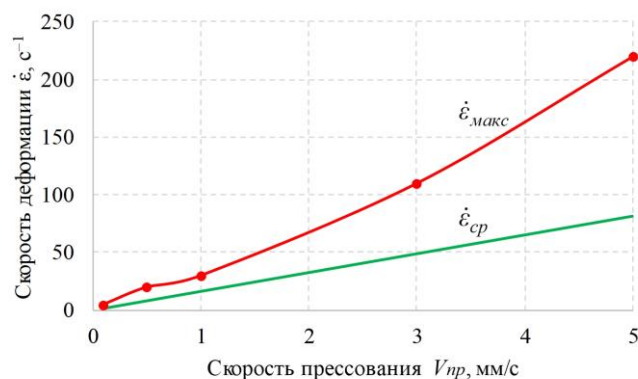


Рис. 6. Зависимость средней и максимальной скорости деформации от скорости прессования

Оценим влияние геометрических параметров очага деформации на среднюю скорость деформации при экструзии проволоки диаметром 2,0 мм. Как видно из рис. 7 увеличение диаметра контейнера при сохранении размера готовой проволоки приводит к увеличению скорости деформации, что связано с повышением коэффициента вытяжки λ .

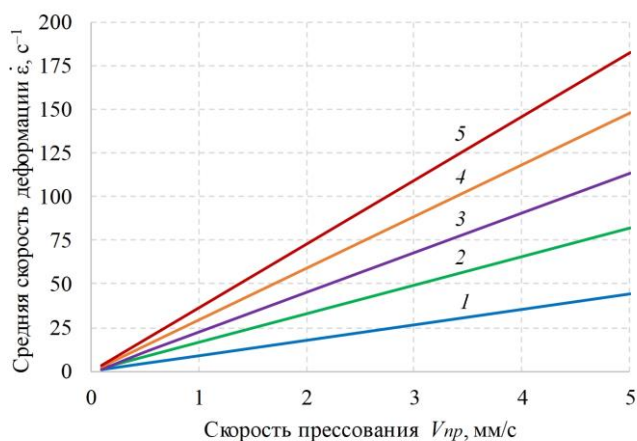


Рис. 7. Влияние скорости прессования на среднюю скорость деформации при разных диаметрах контейнера D_{ex} :
 1 – 11,0 ($\lambda = 30,3$); 2 – 21,8 ($\lambda = 118,8$); 3 – 31,0 ($\lambda = 240,3$);
 4 – 41,0 ($\lambda = 420,3$); 5 – 51,0 мм ($\lambda = 650,3$)

На распределение скоростей по сечению будет оказывать существенное влияние геометрия матрицы. Анализ этого влияния требует проведения дополнительных численных экспериментов в программе QForm.

В свою очередь нужно отметить, что максимальные скорости деформации при скорости прессования 0,1-1,0 мм/с, которые рекомендуются [19] для сплава АМгб могут быть вызваны именно необходимостью ограничения скорости деформации, которая существенно сказывается на сопротивлении деформации сплава, склонности к упрочнению, возможности деформации без образования дефектов, т.е. на его поведении при формоизменении при определенном процессе обработки металлов давлением.

Проведение исследований по анализу влияния режимов деформации на структуру и свойствообразование сплавов, включая и сплав АМгб, следует проводить с учетом картины распределения скоростей деформации по сечению очага деформации.

Для проектирования процессов обработки металлов давлением, особенно малоизученных или новых сплавов следует понимать, как они будут реагировать на технологические параметры процесса, а здесь ключевую роль играет скорость деформации, которая в свою очередь в зависимости от технологических особенностей может принимать значения от 0,1 до 12000 с⁻¹.

Проведенные численные эксперименты позволили определить диапазон скоростей деформации, достигаемый при экструзии проволоки диаметром 2,0 мм. Знание фактического диапазона скоростей деформации необходимо учитывать при проведении исследований реологических свойств металлов и сплавов из которых планируется получать проволоку экструзией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил установить, что:
 - в процессе экструзии проволоки диаметром 2,0 мм независимо от скорости прессования максимальные значения скорости деформации возникают на контакте сплава с матрицей во входной части рабочей зоны монолитной волоки;

- при изменении скорости прессования с 0,1 мм/с до 5,0 мм/с максимальные скорости деформации возросли с 5 до 220 с⁻¹, т.е. в 44 раза, при этом характер распределения скоростей по сечению очага деформации сохраняется;
- максимальная скорость деформации при экструзии может превышать двукратно среднюю скорость деформации;
- при экструзии на скорость деформации существенное влияние оказывает скорость прессования, коэффициент вытяжки и угол матрицы;
- понимание фактически достижимых значений скорости деформации при экструзии проволоки позволит сформулировать требования для проведения испытаний по определению реологических свойств малоизученных и новых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харитонов, В. А. Развитие теории волочения в монолитных волоках в Магнитогорской научной школе / В. А. Харитонов, М. Ю. Усанов // Черные металлы. – 2023. – № 5. – С. 36-40. – DOI 10.17580/chm.2023.05.05. – EDN GOXYWN.
2. Радионова, Л. В. Применение роликового волочения при изготовлении простых и фасонных профилей из труднодеформируемых сплавов / Л. В. Радионова, А. Е. Сарафанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 48-55. – DOI 10.14529/met210406. – EDN OGGTOY.
3. Витушкин, М. Ю. Разработка режимов деформации фасонной проволоки для изготовления скважинных фильтров / М. Ю. Витушкин, В. А. Харитонов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2020. – № 1(32). – С. 14-16. – EDN RXMWVC.
4. Разработка технологии изготовления фасонной проволоки на прокатном стане FPW 220-6 / В. Ф. Даненко, Е. Ю. Кушкина, Т. С. Кубракова [и др.] // Черные металлы. – 2013. – № 10(982). – С. 38-43. – EDN RKPOBN.
5. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л. В. Радионова, С. Р. Фаизов, Д. В. Громов, И. Н. Ермаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 30-38. – DOI 10.14529/met200404. – EDN BMAZKA.
6. Мышечкин, А. А. Совершенствование процесса волочения квадратной проволоки с площадью и противонапряжением в роликовых волоках / А. А. Мышечкин, Е. В. Преображенская, В. В. Зуев // Сталь. – 2021. – № 3. – С. 34-37. – EDN BROOBI.
7. Моделирование реологии стали 08X18H10T и сплава АМгб при высоких скоростях и температурах деформации / А. В. Коновалов, А. С. Смирнов, В. П. Мазунин [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 7-12. – EDN PAZTZF.
8. Исследование локализации пластической деформации в сплавах при различных скоростях деформирования / М. А. Соковиков, М. Ю. Симонов, В. А. Оборин [и др.] // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2021. – Т. 2. – С. 186-189. – EDN IIVRFR.

9. Алдашов, М. К. Исследование закономерностей конструкционных сталей в широких диапазонах температур и скоростей деформаций / М. К. Алдашов, Б. М. Сеитов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2011. – № 3. – С. 73-80. – EDN TGWJAX.

10. Радионова, Л. В. Динамическое и статическое деформационное старение стали при высокоскоростном волочении проволоки / Л. В. Радионова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 1. – С. 38-48. – DOI 10.32339/0135-5910-2023-1-38-48. – EDN NAYELG.

11. Деформационное старение в сталях: учебное пособие / В. М. Фарбер, О. В. Селиванова, В. А. Хотин, О. Н. Полухина; научный редактор А. А. Попов. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2018. — 72 с. EDN OVYBQX.

12. Пышминцев И. Ю., Смирнов М. А. Глава 3. Деформационное старение низкоуглеродистых сталей // Структура и свойства сталей для магистральных трубопроводов. — Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2019. С. 123–174. EDN OYZCTK.

13. Каргин, В.Р. Теория обработки металлов давлением в примерах и задачах: учебное пособие / В.Р. Каргин, Е.С. Нестеренко. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 112 с.

14. Радионова, Л. В. Зависимости сопротивления деформации титановых сплавов от параметров горячего формоизменения / Л. В. Радионова, А. Е. Сарафанов, И. Н. Ермаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2022. – Т. 9, № 4. – С. 53-57. – DOI 10.24892/RIJE/20220410. – EDN USHNXS.

15. Перевозчиков, Д. В. Совершенствование технологии изготовления горячекатаных труб из стали марки 08X18H10T с целью улучшения структуры : специальность 26.40.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Перевозчиков Данил Викторович, 2022. – 161 с. – EDN GGRYAT.

16. Радионова, Л. В. Аналитические исследования влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки / Л. В. Радионова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 28-33. – EDN RXQNQJ.

17. Радионова, Л. В. Исследование влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки в монолитных волокнах / Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 66-75. – DOI 10.14529/met220306. – EDN GRNHPV.

18. Ашкеев, Ж. А. Исследование напряженного состояния и скоростных параметров при несимметричной прокатке / Ж. А. Ашкеев, М. Ж. Абишкенов, Н. Ш. Қансейт // Труды университета. – 2021. – № 2(83). – С. 31-36. – DOI 10.52209/1609-1825_2021_2_31. – EDN PXQVWH.

19. Логинов, Ю. Н. Скорости прессования: противоречия заводской практики / Ю. Н. Логинов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина, Екатеринбург, 29 октября – 02 2012 года / Научный редактор: А. А. Богатов; Редколлегия: В. А. Кокшаров (пред.), А. А. Попов, В. А. Мальцев и др. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013. – С. 197-202. – EDN RUONER.

20. Теория обработки металлов давлением / С. С. Хламкова, А. В. Шульгин, Н. И. Волгина, Б. Ф. Белелюбский. – Москва : МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ, 2022. – 178 с. – ISBN 978-5-276-02688-6. – EDN MWTITV.

21. Исследование напряженно-деформированного состояния проволоки при высокоскоростном монолитном волочении / Л. В. Радионова, Д. В. Громов, Р. А. Лисовский, И. Н. Ермаков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 242-250. – DOI 10.32339/0135-5910-2023-3-242-250. – EDN ZNRHBR.

22. Харитонов, В. А. Моделирование процесса волочения проволоки в монолитной волоке в программном комплексе DEFORM-3D: Электронный ресурс / В. А. Харитонов, М. Ю. Усанов. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. – ISBN 978-5-9967-1282-3. – EDN UQKCDD.

23. Логинов, Ю. Н. Особенности деформированного состояния при калибровке стальной проволоки / Ю. Н. Логинов, С. К. Грехов // Сталь. – 2022. – № 5. – С. 13-16. – EDN XSMZJP.

24. Баталов, Г. С. Разработка новых способов производства двухшовных труб большого диаметра / Г. С. Баталов, А. А. Лунев, Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 37-48. – DOI 10.14529/met190405. – EDN RHJBLH.

25. Иванов, В. А. Микромеханическая модель предельного объема порошковых материалов / В. А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 67-81. – DOI 10.14529/met210308. – EDN GIPZWC.

26. Исследование сходимости результатов моделирования в различных программных комплексах при производстве тройников штампосварных / К. С. Торгонин, Г. С. Баталов, В. В. Широков, Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 58-69. – DOI 10.14529/met210206. – EDN OMSIST.

27. Фаизов, С. Р. Моделирование и прочностной анализ при проектировании оснастки для прямого прессования легкоплавкого припоя / С. Р. Фаизов, Л. В. Радионова // Пром-Инжиниринг : труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 180-185. – EDN IWGNDU.

The Influence of Technological Parameters on the Strain Rate During Wire Extrusion

Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovsky R.A.,
Faizov S.R., Khlamkova S.S.
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
radionovalv@rambler.ru

Glebov L.A.
South Ural State University
(National Research University)
Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. This article presents the results of a QForm simulation of wire extrusion with a diameter of 2.0 mm. During numerical experimental studies, the pressing speed was varied at a level of 0.1; 0.5; 1.0; 3.0 and 5.0 mm/s. The analysis made it possible to establish that during the extrusion of wire with a diameter of 2.0 mm, regardless of the pressing speed, the maximum values of the strain rate occur at the contact of the alloy with the matrix in the entrance part of the working zone of the monolithic die. When the pressing speed changes from 0.1 mm/s to 5.0 mm/s, the maximum strain rates increase from 5 to 220 s⁻¹, i.e. 44 times, while the nature of the distribution of strain rates over the cross section of the deformation zone is preserved. The maximum strain rate

during extrusion can exceed twice the average strain rate. During extrusion, the rate of deformation is significantly influenced by the pressing speed, stretch ratio and die angle. Knowledge of the actually achievable values of the strain rate during wire extrusion allows us to correctly formulate the requirements for carrying out tests to determine the rheological properties of little-studied and new alloys.

Keywords: extrusion, wire, pressing speed, strain rate, extrusion speed, QForm, numerical experiment, finite element method.

Библиографическое описание статьи

Радионова Л.В. Анализ влияния технологических параметров на скорость деформации при экструзии проволоки / Л.В. Радионова, Д.В. Громов, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов, С.С. Хламкова, Глебов Л.А. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т.10, №4. – С. 54-59. DOI: 10.24892/RIJE/20230411

Reference to article

Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R., Khlamkova S.S., Glebov L.A. The influence of technological parameters on the strain rate during wire extrusion, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.4, pp. 54-59. DOI: 10.24892/RIJE/20230411