

Технологические особенности прямой экструзии цинка*

Радионова Л.В., Громов Д.В., Лисовский Р.А.,
Фаизов С.Р., Плужникова О.И.
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 и экспериментальных исследований технологических особенностей прямой экструзии проволоки диаметром 2,0 мм из цинка марки Ц0. Получены зависимости влияния температуры нагрева цинка марки Ц0 на его сопротивление деформации. Приведены результаты расчета средних и максимальных скоростей деформации в зависимости от скорости прямой экструзии проволоки. Показано, что скорость истечения при экструзии не должна превышать 30 мм/с. На основе математического моделирования определены усилия экструзии в зависимости от температуры нагрева заготовки, скорости и степени деформации. В ходе лабораторных экспериментальных исследований определены усилия при горячей и холодной экструзии проволоки из цинка марки Ц0 диаметром 2,0 мм из заготовки диаметром 20,0 мм. Показано, что для выбора температуры нагрева заготовок перед экструзией необходимо учитывать деформационный разогрев металла. При экструзии заготовок, нагретых до 130 °С, усилия не превышали 200 кН, а при экструзии заготовок без нагрева – 300 кН. Проведены исследования микроструктуры проволоки, полученной при холодной и горячей экструзии. Показано, что при горячей и холодной экструзии цинка марки Ц0 протекают рекристаллизационные процессы.

Ключевые слова: экструзия, проволока, скорость прессования, скорость деформации, скорость истечения, QForm, цинк.

ВВЕДЕНИЕ

Цинк – это металл, который имеет высокую коррозионную стойкость [1] и одновременно с этим является биоразлагаемым материалом [2]. Высокая коррозионная стойкость цинка давно и прочно закрепили за ним область применения, связанную с нанесением защитных покрытий на стальные изделия [3].

Развитие аддитивных технологий [4] открывает для цинка новые области применения, связанные как с получением функциональных покрытий, так и с изготовлением из него имплантов и конструкций в высокотехнологичной медицинской помощи [5].

Получение длинномерных изделий из различных сплавов методами экструзии в последние годы стало очень актуальной тематикой как среди мирового научного сообщества [6-10], так и в России [11-15].

Высокая эффективность процесса экструзии [16], возможность на одном оборудовании получать широкий сортамент продукции, допустимость реализации деформации как в холодном, так и горячем состоянии [17, 18] открывает широкие возможности не только для формоизменения, но

и структуро- и свойствообразования для самых разнообразных металлов и сплавов [19].

Для обоснованного выбора технологических параметров обработки металлов давлением в последние десятилетия появилось много эффективных инструментов. Для анализа температурно-скоростных условий деформации [20, 21], напряженно-деформированного состояния при формоизменении [22] в настоящее время активно используется моделирование [23, 24] в основе которого лежит метод конечных элементов. Широкое распространение в мире установок для физического моделирования Gleeble [25] делает доступным исследование реологических свойства металлов и сплавов в различных температурных и скоростных диапазонах [26-28], что позволяет существенно приблизить результаты компьютерного моделирования в таких пакетах как QForm, ABAQUS, Deform 3D к реальному.

Технологичность цинка в процессе обработки давлением зависит от его чистоты. Примеси, даже незначительные, резко увеличивают хрупкость и твердость цинка. Из встречающихся примесей в цинке (Fe, Pb, Cd, Sn и др.) наибольшее влияние на рекристаллизацию оказывает железо [29]. В присутствии тысячных долей процента железа цинк рекристаллизуется при комнатной температуре. Цинк, содержащий 0,01% Fe, рекристаллизуется только при температуре 70-100 °С. Цинк с железом образует твердый раствор (η), однако растворимость последнего в цинке ничтожна (около 0,01%). При содержании 0,2 % Fe цинк становится хрупким, и его обработка затрудняется. Связано это с образованием химического соединения $FeZn_7$. Свинец, кадмий и олово образуют с цинком легкоплавкие эвтектики, которые залегают по границам зерен, служат причиной образования трещин на цинке при горячей обработке. Тройная эвтектика $Zn+Sn+Pb$ плавится при температуре 150 °С.

Цинк имеет гексагональную плотно упакованную решетку (ГПУ) и не обладает полиморфностью. Этим объясняется резкая анизотропия его свойств. Температура плавления – 419,58 °С. Плотность твердого цинка (20 °С) – 7,133 г/см³, а жидкого (419,5 °С) – 6,66 г/см³. Плотность цинка при увеличении его температуры снижается, поскольку происходит увеличение удельного его объема, т.е. цинк расширяется.

Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является анализ технологических особенностей и разработка режимов прямой экструзии проволоки диаметром 2,0 мм.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10179 (Разработка научных и технологических основ получения проволоки из специальных сплавов для аддитивного производства).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРЯМОЙ ЭКСТРУЗИИ ЦИНКА

Для оценки деформационных показателей и энергосиловых параметров процесса экструзии (прессования) ранее нами была разработана математическая модель [30, 31]. Для расчета энергосиловых параметров экструзии цинка необходимо знать механические свойства и сопротивление деформации в зависимости химического состава и температуры металла. Цинк марки Ц0 имеет химический состав, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав (%) цинка по ГОСТ 3640–94

Zn, ≥	Примесь, ≤							
	Pb	Cd	Fe	Cu	Sn	As	Al	Всего
99,975	0,013	0,004	0,005	0,001	0,001	0,0005	0,005	0,025

Пиковые напряжения при одноосном сжатии были нами определены в работе [32]. Зависимости пиковых напряжений от температуры и скорости деформации показаны на рис. 1. Дисперсионный анализ зависимостей показал, что на сопротивление деформации температура оказывает большее влияние, по сравнению со скоростью деформации.

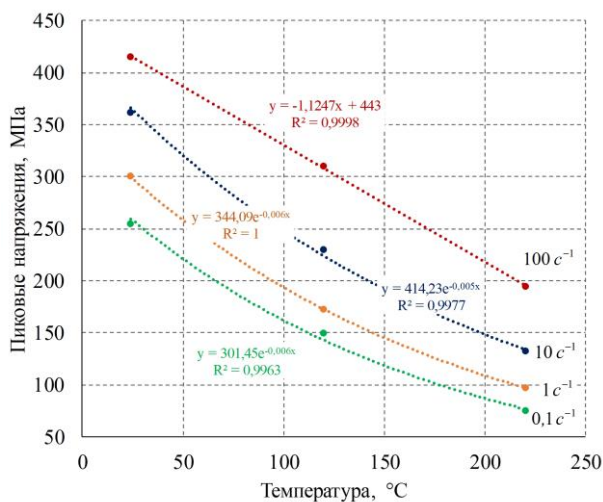


Рис. 1. Зависимости пиковых напряжений при одноосном сжатии цинка марки Ц0 от температуры и скорости деформации

Скорости деформации при экструзии проволоки диаметром 2,0 мм в зависимости от скорости истечения представлены в табл. 2. Максимальная скорость деформации при экструзии может превышать двукратно среднюю скорость деформации [20]. При скорости прессования 0,1-0,3 мм/с максимальная скорость деформации будет в пределах 10 с⁻¹. Максимальные значения сопротивления деформации для этих скоростей будут ограничены кривой синего цвета, приведенной на рис. 1.

Пример расчета технологических параметров экструзии проволоки диаметром 2,0 мм приведен в табл. 3. При экструзии максимальное усилие возникает в момент начала деформации. В табл. 3 это усилие соответствует 280 кН. В конце экструзии заготовки длиной 50 мм усилие составляет 249 кН.

Таблица 2

Результаты расчета средней скорости деформации при экструзии проволоки Ø2,0 мм из заготовки Ø20,0 мм

Скорость прессования V_{np} , мм/с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Скорость истечения $V_{ист} = V_{np} \cdot \lambda$, мм/с	10,5	21,0	31,5	42,0	52,5
Средняя скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	1,5	3,1	4,6	6,2	7,7

Таблица 3

Технологические параметры экструзии проволоки диаметром 2,0 мм

Параметр	Величина
Диаметр заготовки $D_{заг}$, мм	20
Диаметр прутка (проволоки) $D_{пр}$, мм	2,0
Длина заготовки $L_{заг}$, мм	50
Диаметр контейнера $D_{кон}$, мм	20,5
Скорость прессования V_{np} , мм/с	0,1
Сопротивление деформации $\sigma_{ср}$, МПа	150
Угол матрицы 2α , град.	30
Длина калибрующего пояска $L_{кл}$, мм	5
Коэффициент трения f	0,05
Коэффициент вытяжки μ	105,1
Скорость истечения $V_{ист}$, мм/с	10,5
Усилие в начале экструзии F_n , кН	280
Усилие в конце экструзии F_k , кН	249

Влияние величины сопротивления деформации на усилие в начале и конце экструзии показано на рис. 2. Скорость экструзии оказывает влияние на энергосиловой процесс только через сопротивление деформации.

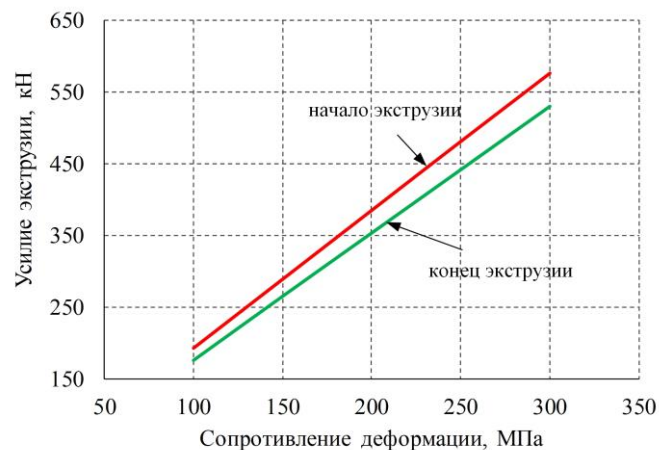
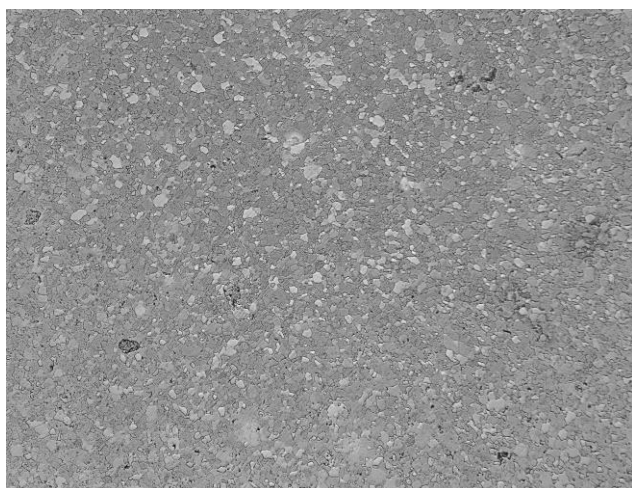


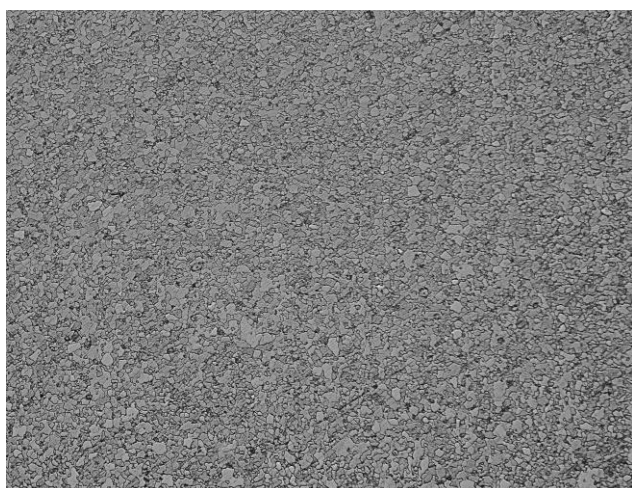
Рис. 2. Зависимости усилия экструзии проволоки Ø2,0 мм из заготовки Ø20,0 мм от сопротивления деформации



a



б



в

Рис. 6. Микроструктура цинка марки Ц0 (x100):
a – исходная заготовка; *б* – температура заготовки 24 °С;
в – температура заготовки 130 °С

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе аналитических и экспериментальных исследований разработана технология прямой экструзии проволоки диаметром 2,0 мм из цинка марки Ц0. На основе математического моделирования определены усилия экструзии

в зависимости от температуры нагрева заготовки, скорости и степени деформации. В ходе лабораторных экспериментальных исследований определены усилия при горячей и холодной экструзии проволоки из цинка марки Ц0 диаметром 2,0 мм из заготовки диаметром 20,0 мм. При экструзии заготовок, нагретых до 130 °С, усилия не превышали 200 кН, а при экструзии заготовки без нагрева – 300 кН. Исследования микроструктуры проволоки, полученной при холодной и горячей экструзии, показали, при интенсивном формоизменении цинка марки Ц0 протекают рекристаллизационные процессы, которые приводят к образованию равноосного зерна, без наличия следов текстуры деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защитные покрытия : Учебное пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2014. – 200 с. – ISBN 978-5-7996-1101-9. – EDN ZVCABZ.
2. Биоразлагаемые металлические материалы для медицины / Э. Д. Хафизова, Р. К. Исламгалиев, Э. И. Фахретдинова [и др.] // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, № 4(6). – С. 54-63. – DOI 10.54708/26587572_2021_34654. – EDN WFTWPA.
3. Экологические перспективы технологий цинкования стали / Л. В. Радионова, Л. А. Глебов, В. А. Быков, М. А. Соседкова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2024. – Т. 80, № 7. – С. 61-70. – DOI 10.32339/0135-5910-2024-7-61-70. – EDN JUGGHG.
4. Каменев, С. В. Технологии аддитивного производства : Учебное пособие / С. В. Каменев, К. С. Романенко. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 145 с. – ISBN 978-5-7410-1696-1. – EDN ZVDBWR.
5. Аддитивные технологии в медицине : Учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 22.04.01 - Материаловедение и технологии материалов / В. В. Попов, Г. В. Муллер-Камский, С. И. Степанов [и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2023. – 92 с. – ISBN 978-5-7996-3690-6. – EDN VTCCHY.
6. Nienaber, M.; Yi, S.; Kainer, K.U.; Letzig, D.; Bohlen, J. On the Direct Extrusion of Magnesium Wires from Mg-Al-Zn Series Alloys. *Metals* 2020, 10, 1208. <https://doi.org/10.3390/met10091208>.
7. Górecki, J.; Talaśka, K.; Wałęsa, K.; Wilczyński, D.; Wojtkowiak, D. Mathematical Model Describing the Influence of Geometrical Parameters of Multichannel Dies on the Limit Force of Dry Ice Extrusion Process. *Materials* 2020, 13, 3317. <https://doi.org/10.3390/ma13153317>.
8. Ostachowski, P., Paliborek, A., Bochniak, W. et al. Mechanical Characteristics and Structure of Highly Deformed Zinc. *J. of Mater Eng and Perform* 31, 3638–3660 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06520-7M>.
9. Milenin, A.; Niedźwiedzki, Ł.; Truchan, K.; Guzik, G.; Kaç, S.; Tylko, G.; Osyczka, A.M. Investigating the Anticancer Potential of Zinc and Magnesium Alloys: From Base Materials to Nanocoated Titanium Implants. *Materials* 2024, 17, 3365. <https://doi.org/10.3390/ma17133365>.

10. Li, M.; Yao, M.; Yang, Y.; Zhao, G.; Wang, Y.; Shu, D.; Chai, S.; Zhang, F.; Xia, X.; Wan, Y.; et al. Effect of Hot Extrusion on Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of Mg-Zn-Mn-0.5Ca Alloy. *Metals* 2024, 14, 1112. <https://doi.org/10.3390/met14101112>.
11. Ресурсосберегающая технология изготовления бесвинцового припоя экструзией / С. Р. Фаизов, Л. В. Радионова, Д. В. Громов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 43-56. – DOI 10.14529/met240106. – EDN TMMXFE.
12. Сравнение вариантов многоканального прессования прутков из сплава В95 / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Загиров, Е. В. Иванов, И. А. Насонов // Технология легких сплавов. – 2021. – № 1. – С. 68-72. – DOI 10.24412/0321-4664-2021-1-68-72. – EDN TGVPD.
13. Анализ энергосиловых параметров экструдирования меди на установке "Конформ" с форкамерой / Ю. В. Горохов, С. В. Беляев, И. Ю. Губанов [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 481-487. – DOI 10.17516/1999-494X-0071. – EDN XRTMCT.
14. Механические и коррозионные свойства сплавов системы Mg-Zn-Ga после горячей экструзии / А. А. Комиссаров, В. Е. Баженов, А. В. Ли [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № S3. – С. 6-12. – DOI 10.31044/1814-4632-2023-3S-6-12. – EDN DLISAT.
15. Sha Sha, Feng Wang, Rongguang Li, Hang Zhang, Wenyuan Cong, Boshu Liu, Shanshan Li, Yan Tang, Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Mn-Ca alloys, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 32, 2024, Pages 1274-1285, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.001>.
16. 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.
17. On the direct extrusion of solder wire from 52In-48Sn alloy / S. Faizov, A. Sarafanov, I. Erdakov [et al.] // *Machines*. – 2021. – Vol. 9, No. 5. – DOI 10.3390/machines9050093. – EDN ORYYEP.
18. Каргин, В. Р. Основы технологических процессов ОМД: раздел прессование : учебное пособие / В. Р. Каргин, Б. В. Каргин ; В. Р. Каргин, Б. В. Каргин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева (Нац. исследовательский ун-т)". – Самара : Изд-во СГАУ, 2011. – 103 с. – ISBN 978-5-7883-0826-5.
19. Junyu Wang, Yuanzhu Long, Chengxue Yang, Jianguo Liu, Aitao Tang, Zhengwen Yu, Fusheng Pan, Hot deformation behavior and extrusion temperature-dependent microstructure, texture and mechanical properties of Mg-1Mn alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, V. 30, 2024, P. 1662-1676, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.190>.
20. Анализ влияния технологических параметров на скорость деформации при экструзии проволоки / Л. В. Радионова, Д. В. Громов, Р. А. Лисовский [и др.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 54-59. – DOI 10.24892/RIJE/20230411. – EDN NFEORR.
21. Исследование локализации пластической деформации в сплавах при различных скоростях деформирования / М. А. Соколов, М. Ю. Симонов, В. А. Оборин [и др.] // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2021. – Т. 2. – С. 186-189. – EDN PVRFR.
22. Исследование напряженно-деформированного состояния проволоки при высокоскоростном монолитном волочении / Л. В. Радионова, Д. В. Громов, Р. А. Лисовский, И. Н. Ермаков // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 242-250. – DOI 10.32339/0135-5910-2023-3-242-250. – EDN ZNRHBR.
23. Исследование сходимости результатов моделирования в различных программных комплексах при производстве тройников штампосварных / К. С. Торгогин, Г. С. Баталов, В. В. Широков, Л. В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 58-69. – DOI 10.14529/met210206. – EDN OMSIST.
24. Демин, Д. О. Имитационное моделирование процесса прокатки прутка круглого сечения на гладкой бочке / Д. О. Демин, Т. М. Лабутина, И. Ю. Захарьев // Новые инновационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – № 19. – С. 168-174. – EDN VTZOND.
25. Физическое моделирование реологических свойств и расчет сопротивления деформации стали 20 в процессе горячей пластической деформации на комплексе Gleeble 3500 / М. В. Чукин, А. С. Ишимов, М. П. Барышников, О. А. Никитенко // Производство проката. – 2015. – № 11. – С. 3-9. – EDN UZLRBZ.
26. Моделирование горячей деформации стали 08X18H10T (AISI 321) одноосным сжатием / С. В. Рушиц, А. М. Ахмедьянов, Д. В. Перевозчиков [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 30-41. – DOI 10.14529/met210203. – EDN SSCSQI.
27. Глебов, Л. А. Физическое моделирование деформационного поведения цинка при одноосном сжатии / Л. А. Глебов, Д. В. Громов, Л. В. Радионова // *Magnitogorsk Rolling Practice 2024 : Материалы VIII международной молодежной научно-технической конференции, Магнитогорск, 04–07 июня 2024 года.* – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 84-86. – EDN VJXJRS.
28. Ишимов, А. С. К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации / А. С. Ишимов, М. П. Барышников, М. В. Чукин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 1(49). – С. 43-52. – EDN TMYTEV.
29. Мальцев, М., Мальцев, М., Под общ. ред. М. В. Мальцева, Барсукова, Т., Борин, Ф. *Металлография цветных металлов и сплавов*, Metallurgizdat, 1960, 372 с. с черт. 3 л. черт. и ил.
30. Математическое моделирование энергосиловых параметров прямого прессования легкоплавких материалов / Л. В. Радионова, С. Р. Фаизов, В. Д. Лезин, А. Е. Сарафанов

// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 71-79. – DOI 10.14529/met200207. – EDN LVYZXD.

31. Radionova, L. V. Mathematical Modelling of Low Temperature Solder Direct Extrusion / L. V. Radionova, S. R. Faizov, A. E. Sarafanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chelyabinsk, 22–24 сентября 2020 года. – Chelyabinsk, 2020. – P. 012107. – DOI 10.1088/1757-899X/969/1/012107. – EDN PLHQIF.

32. Radionova, L.V., Lisovskiy, R.A., Khlamkova, S.S., Gromov, D.V., Glebov, L.A. (2024). Deformation Behavior of Pure Zinc Under Uniaxial Compression. In: Radionov, A.A.,

Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_80.

33. 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 IWGN DU.

DOI: 10.24892/RIJIE/20240412

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

Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovsky R.A.,
Faizov S.R., Pluzhnikova O.I.
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 analytical and experimental studies of the technological features of direct extrusion of 2.0 mm diameter wire from zinc grade Ts0. The dependences of the effect of heating temperature of zinc grade Ts0 on its deformation resistance are obtained. The results of calculating the average and maximum deformation rates depending on the direct wire extrusion rate are presented. It is shown that the flow rate during extrusion should not exceed 30 mm/s. Based on mathematical modeling, the extrusion forces are determined depending on the billet heating temperature, speed and degree of deformation. In the course of laboratory experimental studies, the forces during hot and cold extrusion of zinc wire grade Ts0 with a diameter of

2.0 mm from a workpiece with a diameter of 20.0 mm were determined. It is shown that to select the heating temperature of the workpieces before extrusion, it is necessary to take into account the deformation heating of the metal. During extrusion of blanks heated to 130 °C, the forces did not exceed 200 kN, and during extrusion of blanks without heating – 300 kN. Studies of the microstructure of wire obtained during cold and hot extrusion were conducted. It was shown that during hot and cold extrusion of zinc grade Ts0, recrystallization processes occur.

Keywords: extrusion, wire, extrusion speed, strain rate, flow rate, QForm, zinc.

Библиографическое описание статьи

Радионова Л.В. Технологические особенности прямой экструзии цинка / Л.В. Радионова, Д.В. Громов, Р.А. Лисовский, С.Р. Фаизов, О.И. Плужникова, Л.А. Глебов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т.11, №4. – С. 71-76. DOI: 10.24892/RIJIE/20240412

Reference to article

Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovsky R.A., Faizov S.R., Pluzhnikova O.I., Glebov L.A. The influence of technological parameters on the strain rate during wire extrusion, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 71-76. DOI: 10.24892/RIJIE/20240412