

ХОЛОДНЕ ПРОКАТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-MG

Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву системи Al-Mg холодним прокатуванням. Чисельне моделювання процесу холодного прокатування алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли напружень (інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування,) при максимальному моменті на валках та деформації (інтенсивності деформації та інших компонентів) в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, метод скінченних елементів, моделювання, прокатування, інтенсивність напружень, інтенсивність деформації, середні напруження, середні деформації, крайові зони.

Прокатування – такий вид обробки металів тиском (ОМТ), під час якого заготовка силами тертя втягується у проміжок між обертальними валками, які її пластично деформують, при цьому зменшуючи площу поперечного перерізу і збільшуючи довжину. Цей процес належить до найпродуктивніших видів обробки завдяки безперервності процесу і великій швидкості руху заготовки між валками. Цим способом обробляють приблизно 90 % витоленої на металургійних заводах сталі та понад половину кольорових металів і їх сплавів [1]. На сьогодні застосування алюмінієвих сплавів є досить поширеним та має великі перспективи розвитку в подальшому. Ці сплави є основою багатьох конструкцій, використовуються в провідних галузях техніки – в авіації, ракетно-космічній і атомній техніці. Нові сплави створюють, спираючись на теоретичні відкриття й узагальнення, на результати вирішення численних технічних проблем, їх застосування зумовлює значний прогрес у різних галузях науки і техніки [2]. Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Раніше в роботах [3, 4] було розглянуто прокатування алюмінієвих сплавів системи Al-Mg.

Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. Їх відносний об'єм характеризує пошкоджуваність металу, яка не повинна перевищувати деякого критичного значення, так як при його перевищенні відбувається втрата міцнісних характеристик виробу. На сьогодні опубліковано достатньо багато моделей, за допомогою яких можна оцінювати пошкоджуваність металічних матеріалів при обробці тиском. При моделюванні процесів холодної ОМТ із використанням різноманітних сучасних програмних комплексів велике значення мають закладені в них умови руйнування. Як відмічає автор роботи [5], програмні комплекси, за рідким виключенням, задовільні в частині розрахунку руйнування металів. Програмний комплекс DEFORM-3D для прогнозування руйнування металу при пластичній деформації передбачає вибір моделі руйнування на розсуд дослідника. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham, згідно якої [6]:

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

де σ_{max} – максимальне головне розтягувальне напруження; $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень; $\bar{\varepsilon}$ – інтенсивність деформацій; C – граничне значення показника Cockroft & Latham, що відповідає моменту руйнування матеріалу.

В роботах [7, 8] представлена методика прогнозування руйнування металу при великій пластичній деформації із використанням енергетичної моделі Cockroft & Latham, згідно якої робота елементарної розтягувальної сили, що діє на матеріальну точку тіла в процесі деформації, характеризує пошкоджуваність металу. Руйнування відбувається при досягненні роботою критичного значення.

Метою роботи є чисельне моделювання та аналіз напружено-деформованого стану і пошкоджуваності алюмінієвого сплаву системи Al-Mg при холодному прокатуванні.

Чисельне моделювання процесу холодного прокатування (рис. 1) алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. Смуга товщиною 6 мм встановлюється між валками, в результаті на виході отримуємо прокат товщиною 4 мм.

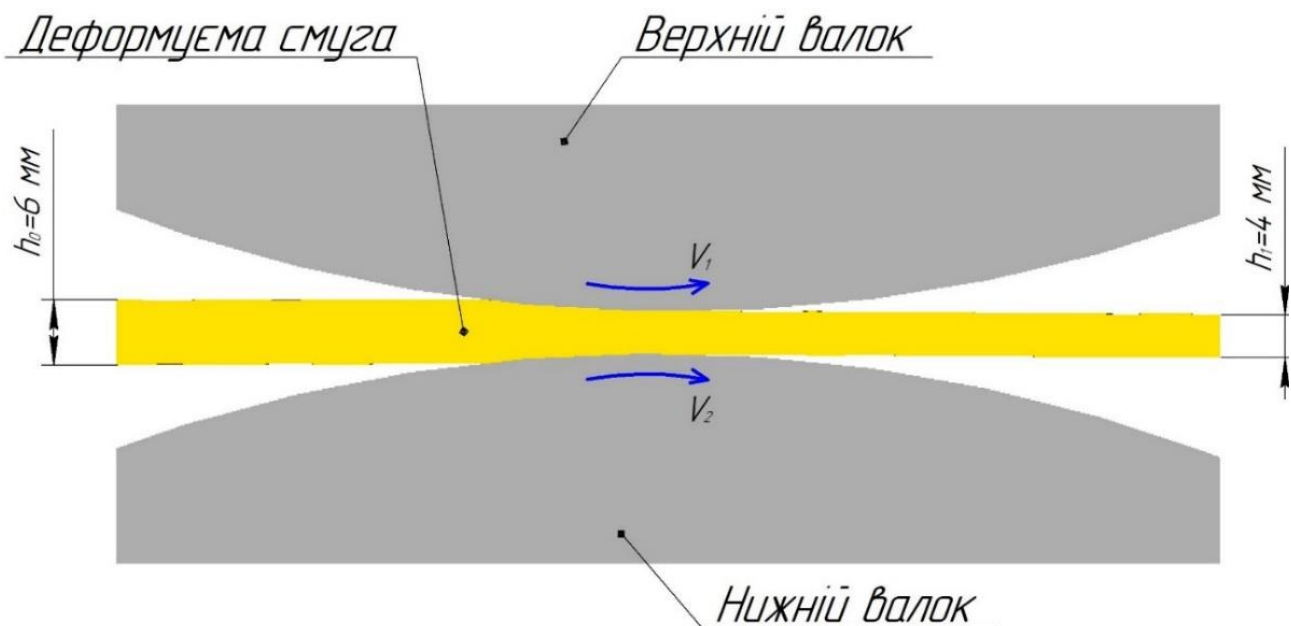


Рис. 1. Схема процесу прокатування в програмі DEFORM-3D

При моделюванні були прийняті наступні допущення: 1) деформуєма заготовка пластична; 2) робочі валки – абсолютно жорсткі; 3) закон контактного тертя – Кулона; 4) еволюцію мікроструктури не враховували.

Вихідною заготовкою для проведення чисельного моделювання першого переходу холодного прокатування була смуга товщиною 6 мм, шириною 35 мм та довжиною 170 мм, що отримана гарячим прокатуванням із пресованої штаби товщиною 12 мм. При моделюванні було задано наступні вихідні дані:

- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0,12$;
- кутова швидкість валків - $\omega_0 = 1,26$ рад/с (повний оберт валка за 5 с);
- температура заготовки та валків – 20 °С;
- матеріал – AL-5056 (аналог сплаву АМг5);
- діаметр валків 300 мм.

В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках, який показано на рис. 2. З графіка видно, що максимальний момент становить 2200000 Н·мм (2,2 кН·м).

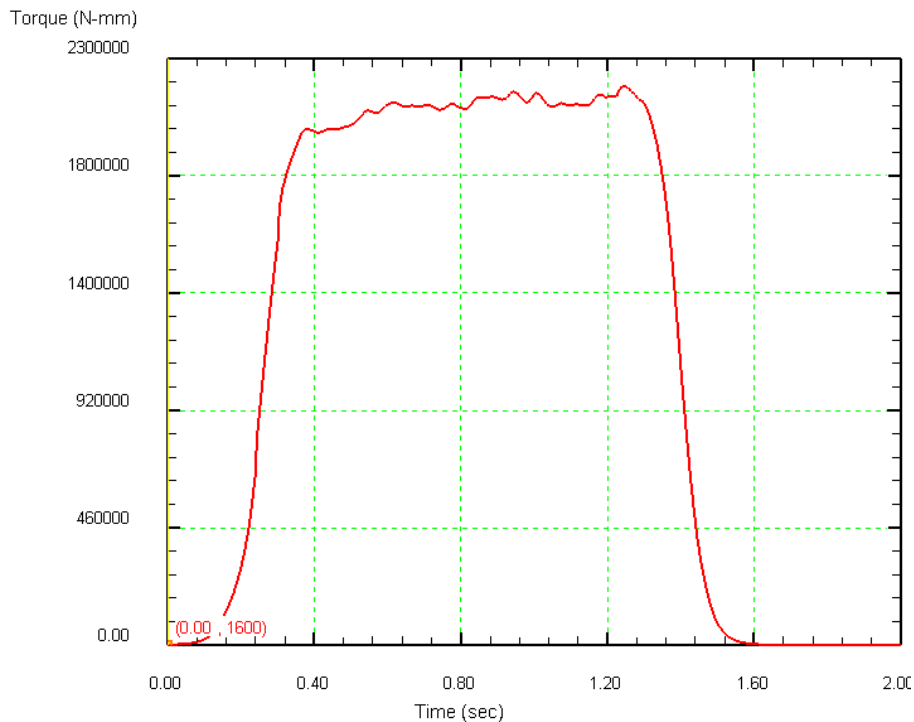


Рис. 2. Графік залежності моментів, що виникають на валках при холодному прокатуванні від часу

На рис. 3 показано розподіл інтенсивності напружень σ_i в осередку деформацій під час прокатування. Значення інтенсивності напружень становлять до $\sigma_i = 370$ МПа. По ширині смуги значення інтенсивності напружень не відрізняються.

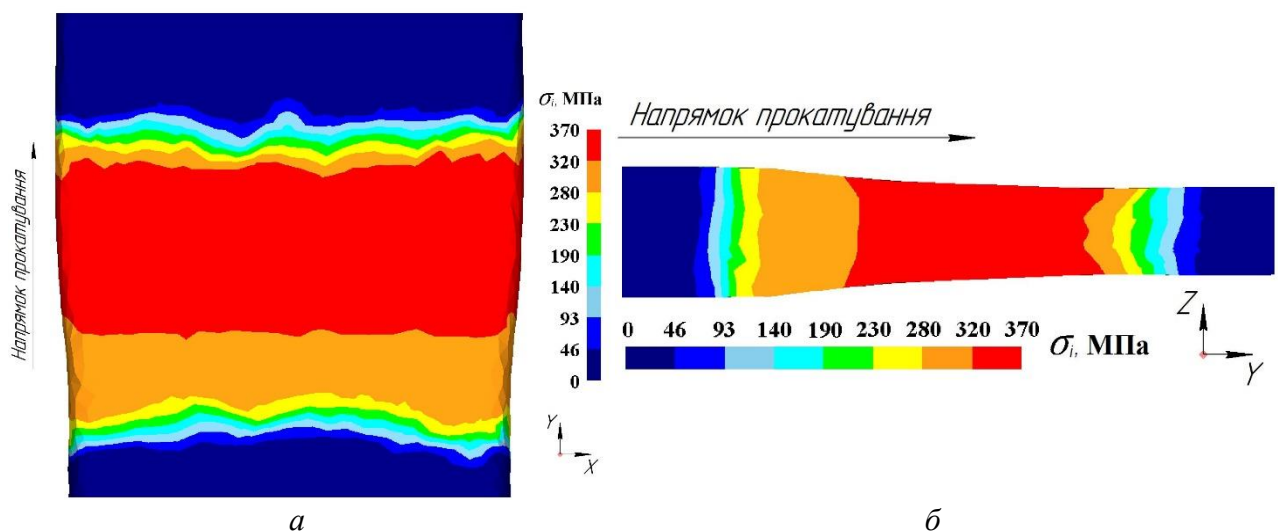


Рис. 3 Розподіл інтенсивності напружень в осередку деформацій під час прокатування:

a – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY

На рис. 4 показано розподіл середніх напружень $\sigma_{сер}$ в осередку деформацій під час прокатування. Їх значення знаходяться в межах $\sigma_{сер} = -400 \dots 150$ МПа. По центру смуги в осередку деформації виникають найбільш стискаючі середні напруження

$\sigma_{\text{сер}} = -400 \dots -260$ МПа. На вході та на виході смуги між валками виникають розтягувальні середні напруження $\sigma_{\text{сер}} = 13 \dots 150$ МПа.

Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу ε_i в zdeформованій смугі показано на рис. 5. Їх значення досягають величини $\varepsilon_i = 0,5$. Практично по всьому об'єму прокатоної смуги значення інтенсивності деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0,38 \dots 0,5$; на краях смуги $\varepsilon_i = 0,31 \dots 0,38$.

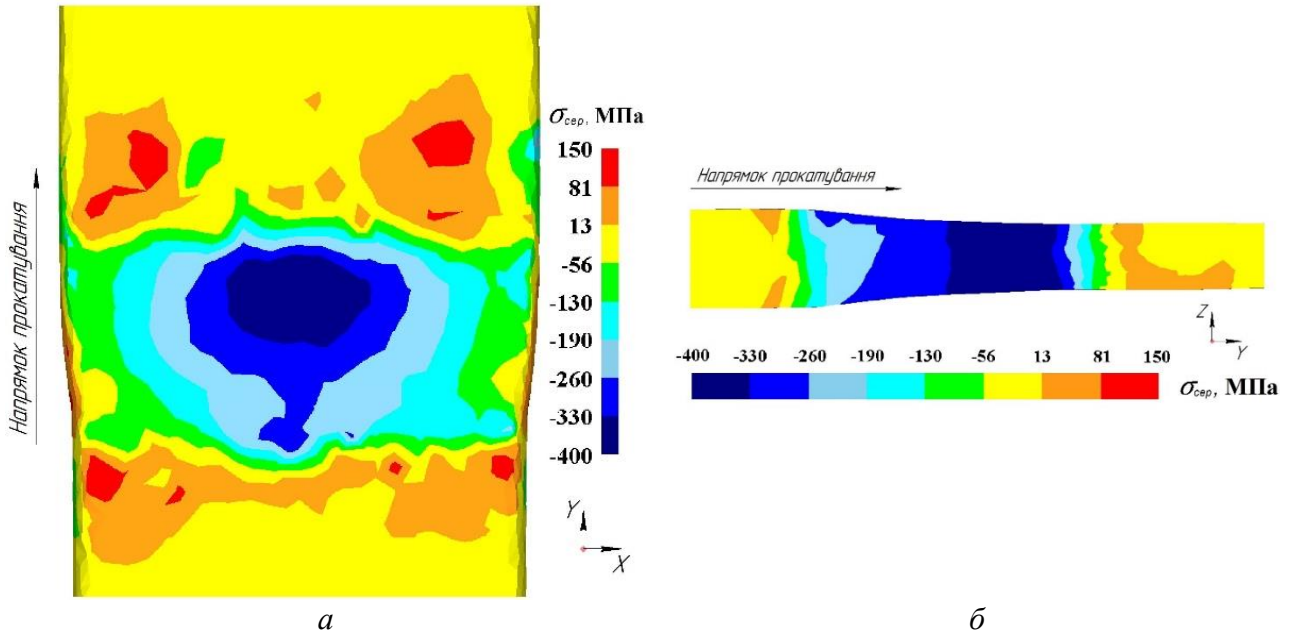


Рис. 4. Розподіл середніх напружень в осередку деформацій під час прокатування: *a* – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY

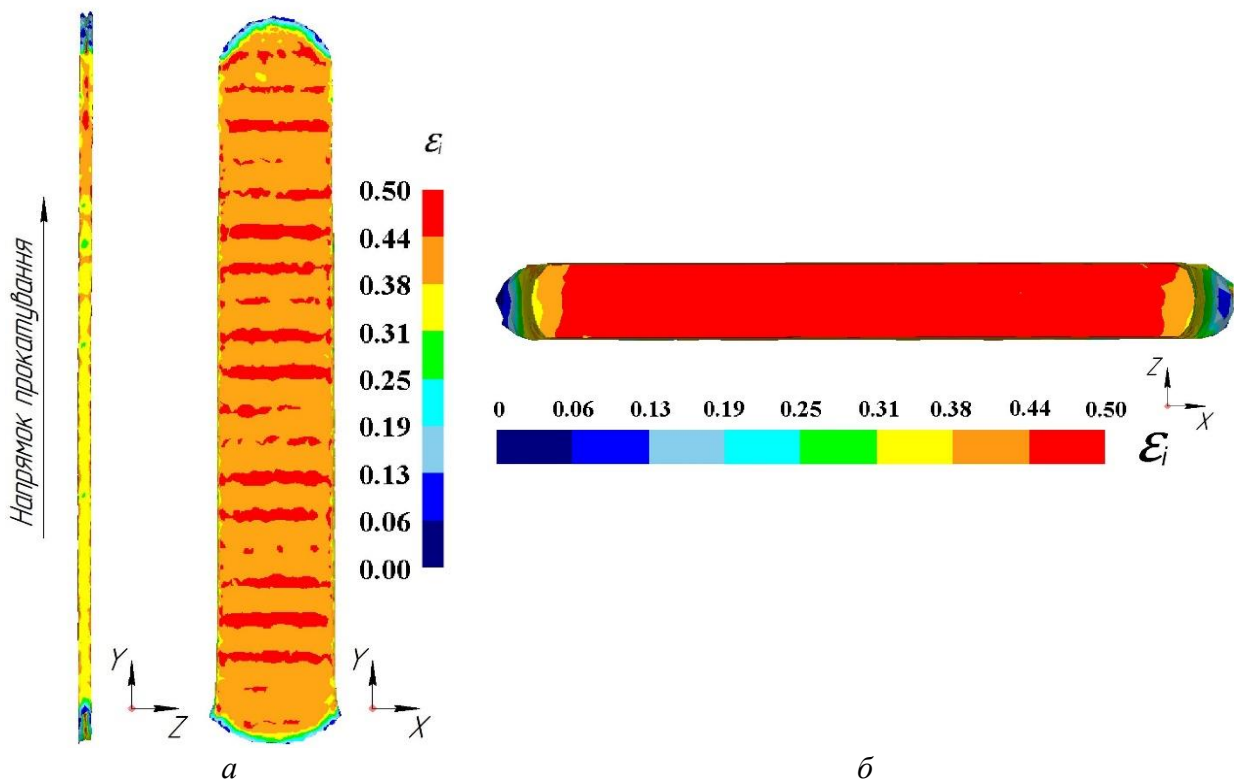


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу в zdeформованій смугі: *a* – на поверхні смуги в площині YZ та YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 6 показаний розподіл пошкоджуваності металу в zdeформованій смузі після холодного прокатування. На краях смуги на глибину 2..3 мм значення пошкоджуваності досягають 0,2...0,3. В центрі ж смуги пошкоджуваність відсутня.

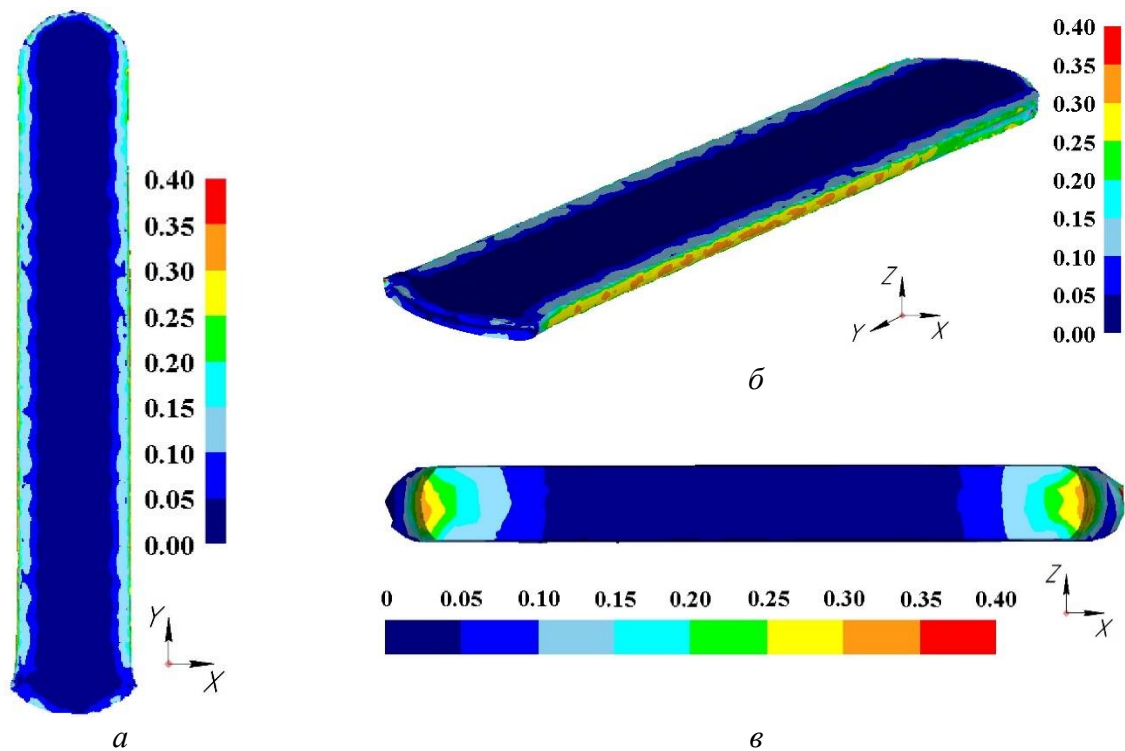


Рис. 6. Розподіл пошкоджуваності в zdeформованій смузі:
 а – на поверхні смуги в площині YX; б – на поверхні смуги в ізометрії; в – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 7 показано прокатані смуги товщиною 4 мм, що отримані в результаті експериментальних досліджень, а також мікроструктура в поперечному перерізі смуги. Після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

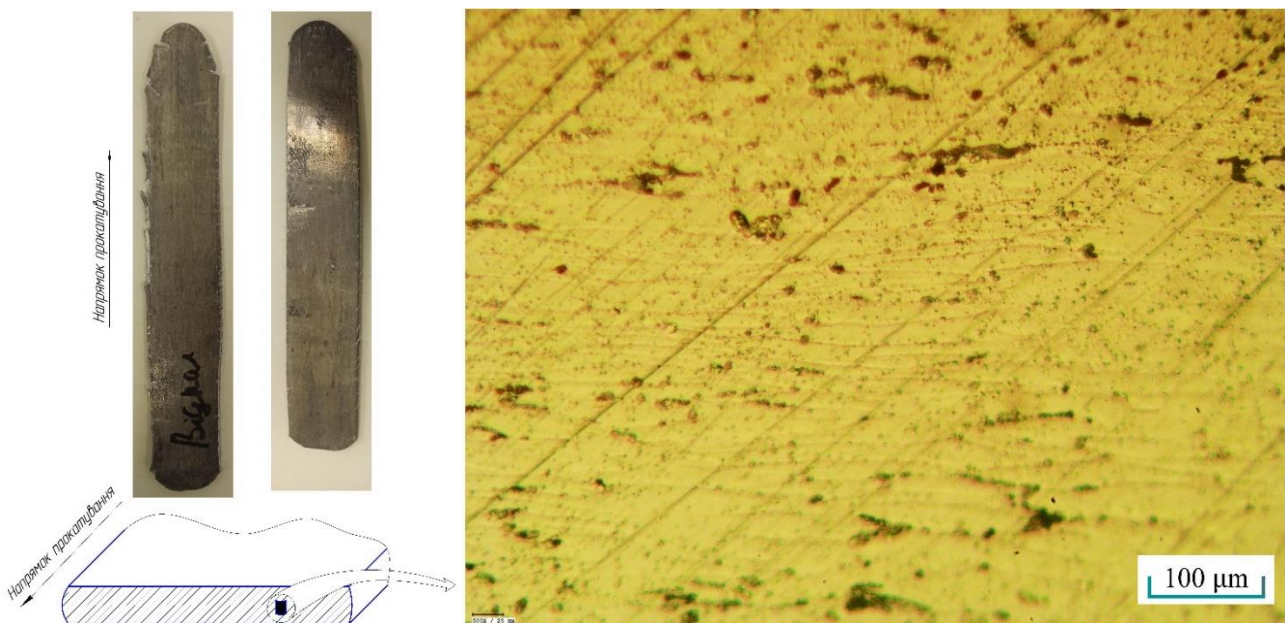


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень холодного прокатування смуг та мікроструктура в поперечному перерізі

ВИСНОВКИ

В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg холодним прокатуванням. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування при максимальному моменті на валках та інтенсивності деформацій по Мізесу в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. При чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100...200 мкм та шириною 10...20 мкм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ерисов Я. А., Гречников Ф.В., Гречникова А.Ф. Исследование влияния режимов прокатки и термообработки на структуру и свойства листов из алюминий-литиевого сплава В-1461. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2019. 5. С. 5–10.
2. Калініна Н.Є., Бондаренко О.В. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці: навч. посіб. Дніпро: РВВ ДНУ. 2011. 64 с.
3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des.* 2016. 100, pp. 151 – 156.
4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram.* 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.
5. Колмогоров В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2003. 2. С. 4 – 16.
6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals.* 1968. 96, pp. 33 – 39.
7. Боткин А.В., Валиев Р.З. и др. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта-Латама. *Деформация и разрушение материалов*. 2011. 7. С. 17–22.
8. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М. Оценка поврежденности металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083. *Качество в обработке материалов*. 2015. 2 (4). С. 63–67.

REFERENCES

1. Erisov Ya. A., Grechnikov F.V., Grechnikov A.F. Study of the influence of rolling and heat treatment modes on the structure and properties of sheets from aluminum-lithium alloy V-1461. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. 5, pp. 5-10. (in Russian).
2. Kalinina, N.E., Bondarenko O.V. The use of aluminum alloys in aviation and rocket and space technology: training. manual. Dnipro: RVV DNU. 2011. 64 p. (in Ukrainian).
3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des.* 2016. 100, pp. 151 – 156.
4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram.* 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.
5. Kolmogorov V.L. Numerical modeling of large plastic deformations and destruction of metals. *Forging and stamping production*. 2003. 2, pp. 4 –16. (in Russian).
6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals.* 1968. 96, pp. 33 – 39.
7. Botkin A.V., Valiev R.Z., et al. Assessment of metal damage during cold plastic deformation using the Cockcroft-Latham fracture model. *Deformation and destruction of materials*. 2011. 7, pp. 17-22. (in Russian).
8. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Lokotunina N.M. Assessment of metal damage during asymmetric thin-sheet rolling of aluminum alloy 5083. *Quality in processing materials*. 2015. 2 (4), pp 63-67. (in Russian).

Koreva V. O. Cold rolling of Al-Mg system aluminum alloy

Aluminum weldable and thermally non-strengthening alloys of the Al-Mg system are widely used as light structural materials in various industries. Improving the specific strength characteristics of such alloys due to cold plastic deformation is one of the urgent scientific and technical problems. However, an important issue in the development of technological modes of plastic deformation of aluminum alloys is also the prediction of destruction, which is accompanied by the development and increase in the number of micropores and microcracks. In the work, the study of the deformation treatment of the aluminum alloy of the Al-Mg system by cold rolling was carried out. Numerical modeling of the process of cold rolling of aluminum alloy 5056 of the Al-Mg system was carried out by the finite element method using the DEFORM-3D software package for engineering analysis of technological operations of pressure metal processing. As a result of the numerical experiment, a graph of the moments occurring on the rolls was obtained. Distributions of stresses

(intensity of stresses and average stresses in the center of deformation) at the maximum moment on the rolls and deformations (intensity of deformations and other components) at the end of deformation were also obtained. An analysis of the damage accumulation established by simulation was carried out. In this paper, during numerical modeling, metal damage was calculated according to the Cockroft & Latham failure criterion. The results of experimental studies, including microstructures, after the rolling process are also given. It was established that after rolling we get a grain with a length of 100...200 microns and a width of 10...20 microns.

Keywords: aluminium alloy, finite element method, modeling, rolling, stress intensity, strain intensity, average stresses, average strains, edge zones.

Корева В. О. Холодная прокатка алюминиевого сплава системы Al-Mg

Алюминиевые сварные и термически не укрепляемые сплавы системы Al-Mg широко используются в качестве легких конструкционных материалов в различных отраслях промышленности. Улучшение удельных прочностных характеристик таких сплавов за счет холодной пластической деформации является одной из актуальных научно-технических проблем. Однако важным вопросом при разработке технологических режимов пластического формоизменения алюминиевых сплавов также является прогнозирование разрушения, которое сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин. В работе выполнено исследование деформационной обработки алюминиевого сплава системы Al-Mg холодной прокаткой. Численное моделирование процесса холодной прокатки алюминиевого сплава 5056 системы Al-Mg выполняли методом конечных элементов с использованием программного комплекса для инженерного анализа технологических операций обработки металлов давлением DEFORM-3D. В результате численного эксперимента был получен график моментов, возникающих на валках. Также получены распределения напряжений (интенсивности напряжений и средних напряжений в очаге деформирования) при максимальном моменте на валках и деформациях (интенсивности деформаций и других компонентов) в конце деформирования. Проведен анализ накопления повреждаемости, установленной моделированием. В данной работе при численном моделировании повреждаемость металла рассчитывали по критерию разрушения Cockroft&Latham. Также приведены результаты экспериментальных исследований, в том числе микроструктуры после проведенного процесса прокатывания. Установлено, что после прокатки получаем зерно длиной 100...200 мкм и шириной 10...20 мкм.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, метод конечных элементов, моделирование, прокатка, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, средние напряжения, средние деформации, краевые зоны.

Корева Віталій Олегович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Koreva Vitalii – PhD student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Корева Виталий Олегович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

E-mail: koreva85@gmail.com

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.