

Тітов А. В.
Корева В. О.
Тимошенко О. В.

ОЦІНКА ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-MG-SC МЕТОДАМИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Розроблена методика та проведено дослідження подовження ресурсу пластичності конструкційного алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc термомеханічною обробкою з використанням проміжних відпалів при процесах деформування. Проводились випробування на зразках за схемою на розтяг. Для проведення експериментального дослідження по визначенню подовження ресурсу пластичності термомеханічною обробкою використано зразки із листа товщиною 2 мм із алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc. Наведені результати досліджень для різних коефіцієнтів використання ресурсу пластичності на і-му переході. Встановлена величина сумарної реалізованої пластичності, яка відображає вплив проміжних операцій термообробки на пластичність сплаву після механічної обробки деформацією. В результаті, встановлено, що падіння ефективності проміжного відпалу пояснюється накопиченням пошкоджень металу при попередній деформації. Встановлено, що за допомогою проміжних відпалів забезпечується зростання ресурсу пластичності матеріалу в 1,5...1,6 рази. Наведені залежність сумарної реалізованої пластичної деформації від кількості циклів «Д+ТО», залежність залишкового ресурсу пластичності на і-му циклі від кількості циклів та залежність коефіцієнта відновлення ресурсу пластичності від кількості циклів «Д+ТО». Також побудована гранична поверхня залежності пластичності матеріалу від термомеханічної обробки та кількості переходів за результатами повного дослідження, яка визначає пластичність матеріалу в залежності кількості циклів обробки «деформація + термічна обробка» та дозволяє вибирати параметри заготовок деталі на етапі проектування технологічного процесу.

Ключові слова: ресурс пластичності, конструкційні матеріали, термомеханічна обробка, алюмінієвий сплав, розтяг.

Використання нових конструкційних матеріалів та технологічних процесів виготовлення виробів машинобудування дозволяє підвищити їх експлуатаційні характеристики, забезпечуючи високі механічні властивості та якість елементів конструкції. Ефективність виготовлення складних деталей досягається завдяки високій пластичності металів, а їх якість контролюється за рахунок використання регламентованого ресурсу пластичності (РП). Останнім часом спостерігається активний розвиток процесів, які збільшують ресурс пластичності шляхом застосування термомеханічної обробки. Цей метод включає одночасну або послідовну дію навантаження та температурний вплив [1-7]. До таких методів відносять використання проміжних відпалів, а також високотемпературне ізотермічне формоутворення з конструкційних матеріалів. В роботі [7] представлений розроблений метод, що дозволяє розраховувати граничну формозміну заготовки в процесах багатоперехідного деформування із врахуванням відновлення пластичності в паузах між одиничними обтисками (проходами), тривалості цих пауз та величини дробних деформацій. Результати розрахунку процесу дробного осаджування заготовки із використанням запропонованого методу добре погоджуються із експериментальними даними. В роботах В.Л. Колмогорова, О.О. Богатова та інших в рамках феноменологічної теорії пошкоджуваності показано, що існує межа величини інтенсивності деформацій для деяких сплавів (на основі заліза, міді, тощо), при якій після термічної обробки ресурс пластичності відновлюється на 85–90 % [1, 2, 4]. Це сприяє розвитку багатоперехідних процесів пластичного деформування при виготовленні деталей.

У зв'язку із появою нових матеріалів та сплавів, починаючи із 70-х років минулого століття, однією з основних задач теорії пластичності стає визначення можливості здійснення технологічних операцій пластичного формування заготовок із різних матеріалів без руйнування [1-3, 7, 8]. При цьому, оцінка ресурсу пластичності становиться важкою та іноді невірниською задачею.

В статті розглянута актуальна науково-технічна задача розробки методики оцінки подовження ресурсу пластичності конструкційних сплавів на прикладі нового алюмінієвого

сплаву системи Al-Mg-Sc з використанням доступного виду випробувань на розтяг в циклі «деформація + термічна обробка» («Д+ТО»).

Метою роботи є розроблення методики оцінки подовження ресурсу пластичності конструкційних матеріалів термомеханічною обробкою (ТМО) з використанням проміжних відпалів при виконанні операцій деформування.

Методика роботи визначає порядок проведення експериментів на одновісний розтяг з проміжними відпалами. Сумарне подовження зразків в процесі проведення експериментів визначається у відповідності до наведеного алгоритму.

Порядок проведення експерименту наступний:

1. Розподіл зразків на групи, їх маркування.
2. Вимірювання точних розмірів зразків електронним штангенциркулем.
3. Проведення відпалу всіх груп зразків за режимом гомогенізації.
4. Випробування на розтяг до руйнування контрольної групи зразків та визначення їх максимального РП вихідного матеріалу заготовки e_{max_0} після проведення термічної обробки – відпалу.

5. Задати для випробувань коефіцієнт використання ресурсу пластичності k на i -му циклі «Д+ТО». Випробування на розтяг решти груп зразків до величини деформації $e_i = ke_{max_{(i-1)}}$, що визначає використаний РП на i -му циклі.

6. Проведення термічної обробки попередньо здеформованих зразків за обраним режимом.

7. Випробування на розтяг до руйнування i -ої групи зразків та визначення їх e_{max_i} , де e_{max_i} – залишковий РП на i -му циклі після проведення термічної обробки для відновлення РП.

8. Повторення п. 5, 6 та 7 до встановленої кількості переходів.

Сумарна реалізована пластичність металу в технологічному процесі ТМО для $k = const$ визначається за наступною залежністю:

$$e_{\Sigma} = e_{max_i} + \sum_{i=1}^n e_i \quad (1)$$

Ця величина пластичності відображає вплив проміжних операцій термообробки на пластичність сплаву після механічної обробки деформацією.

Нижче наведені результати експериментів для $k = 0,25$ та $k = 0,5$.

Температурні режими термічної обробки (відпалу) для проведення експерименту:

- температура нагріву заготовок – 325 °С;
- час витримки в нагрітому стані – 30 хвилин;
- охолодження – на повітрі.

Методика проведення випробувань на одновісний розтяг виконувалася згідно «ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури» [9].

Внаслідок обмеження кількості матеріалу були вибрано короткі зразки для проведення експериментальних досліджень. На рис. 1 показано розміри експериментальних зразків на одновісний розтяг. Для проведення експериментального дослідження по визначенню подовження ресурсу пластичності термомеханічною обробкою використано зразки із листа товщиною 2 мм із алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc для випробувань на одновісний розтяг.

Випробування на одновісний розтяг було проведено на універсальній випробувальній машині TIRA TEST-2300 (рис. 2) на кафедрі «Динаміки міцності машин та опору матеріалів» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

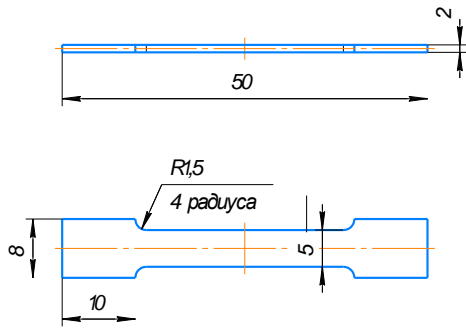


Рис. 1. Креслення зразка



Рис. 2. Універсальна випробувальна машина TIRA TEST-2300.

Сумарна реалізована пластична деформація після проведення експерименту для $k = 0,25$ було визначено за значеннями використаних ресурсів пластичності на кожному переході (в даному випадку 6 циклів «Деформація – Термічна обробка») за формулою (1):

$$e_{\Sigma} = 44,6 \%$$

Отже, $e_{\Sigma} > e_{max0}$ в 1,76 разів.

Сумарна реалізована пластична деформація після проведення експерименту для $k = 0,5$ було визначено за значеннями використаних ресурсів пластичності на кожному переході (в даному випадку 3 цикли «Деформація – Термічна обробка») за формулою (1):

$$e_{\Sigma} = 41,3 \%$$

Отже, $e_{\Sigma} > e_{max0}$ в 1,58 разів.

Графік залежності сумарного значення відносного подовження зразка (сумарної реалізованої пластичної деформації) від кількості циклів «Деформація + Термічна обробка» («Д+ТО») показано на рис. 3.

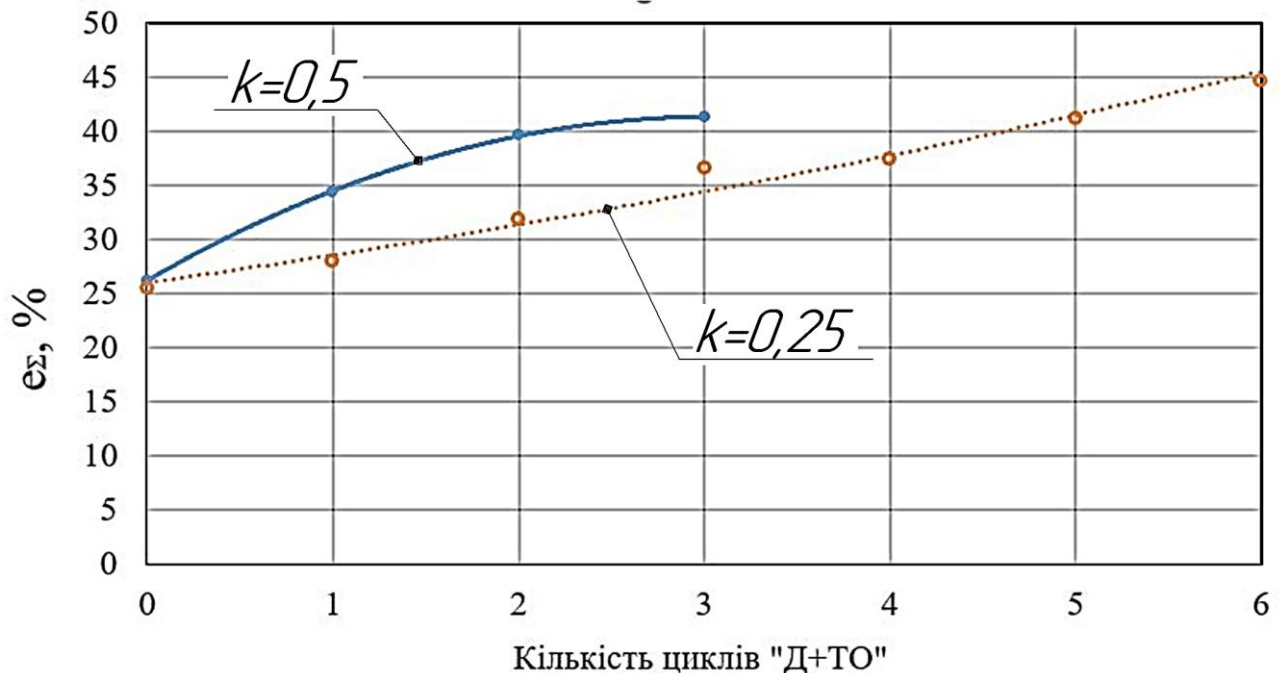


Рис. 3. Залежність сумарної реалізованої пластичної деформації від кількості циклів «Д+ТО»

В результаті, встановлено, що термічна обробка після попередньої пластичної деформації 25 % від ресурсу пластичності дає підвищення ресурсу пластичності наступні:

а) після I-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 18,9 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 21,5 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,1 разів.

б) після II-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 16,1 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 19,9 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,2 разів.

в) після III-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 14,9 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 19,7 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,3 разів.

г) після IV-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 14,8 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 15,6 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,1 разів.

г) після V-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 11,7 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 15,4 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,3 разів.

д) після VI-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 11,6 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 15,1 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,3 разів.

В результаті, встановлено, що термічна обробка після попередньої пластичної деформації 50 % від ресурсу пластичності дає підвищення ресурсу пластичності наступні:

а) після I-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 13,1 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 21,3 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,6 разів.

б) після II-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 10,7 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 15,9 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,5 разів.

в) після III-го циклу:

- залишковий ресурс пластичності становить 7,9 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 9,7 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,2 разів.

Графік залежності залишкового ресурсу пластичності e_{max_i} на i -му циклі від кількості циклів показано на рис. 4.

Введемо для відношення відновленого ресурсу пластичності до залишкового коефіцієнт K – коефіцієнт відновлення ресурсу пластичності.

$$K = \frac{e_{max_i}}{(1 - k)e_{max_{(i-1)}}} \quad (2)$$

тут $(1 - k)e_{max_{(i-1)}}$ – залишковий РП на i -му переході до проведення термічної обробки для відновлення РП.

Залежність коефіцієнта K від кількості відпалів показана на рис. 5.

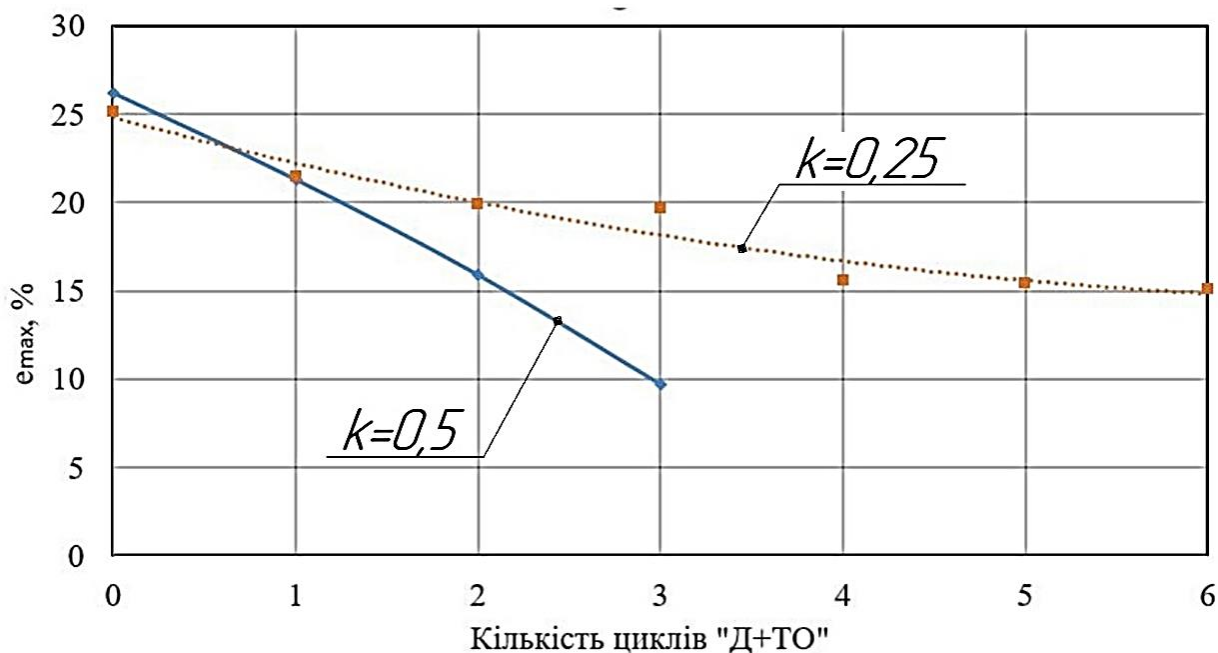


Рис. 4. Залежність залишкового ресурсу пластичності на i -му циклі від кількості циклів.

Група зразків, які проходили ТО без деформування, свідчить про те, що на ресурс пластичності не впливає кількість відпалів, так як:

$$e_{max0} = 26,2 \% \approx e_{maxTO} = 26,1 \%$$

Отже, можна дійти до висновку, що ефективність відпалу при коефіцієнті використання ресурсу пластичності $k = 0,5$ падає через накопичення пошкоджень металу при попередній деформації.

Також були проведені дослідження із коефіцієнтом використання ресурсу пластичності $k = 0,75$. За результатами яких було отримано граничну поверхню залежності пластичності матеріалу від термомеханічної обробки та кількості циклів «Д+ТО», яку показано на рис. 6.

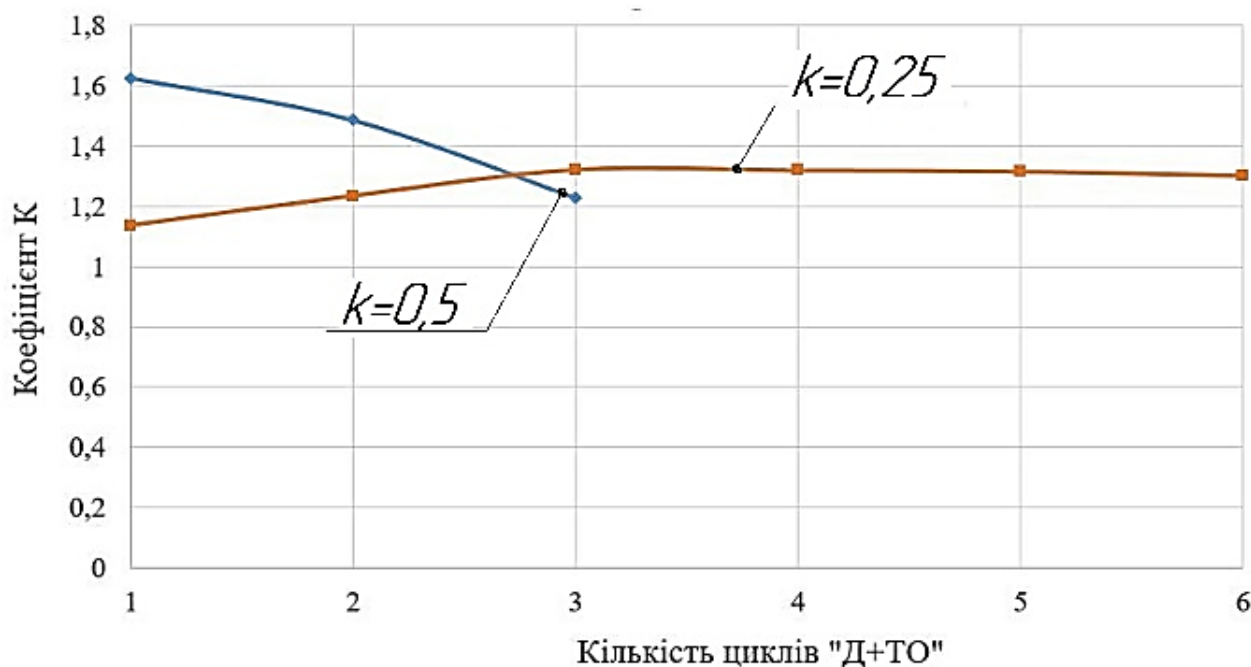


Рис. 5. Залежність коефіцієнта K від кількості циклів «Д+ТО»

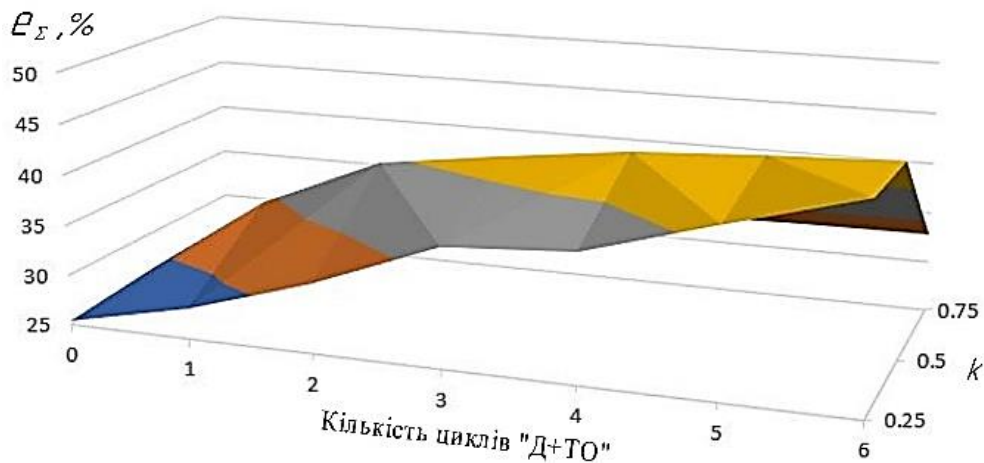


Рис. 6. Гранична поверхня залежності пластичності матеріалу від термомеханічної обробки та кількості переходів

Наведена гранична поверхня визначає пластичність матеріалу в залежності кількості циклів обробки «деформація + термічна обробка» та дозволяє вибирати параметри заготовок деталей на етапі проектування технологічного процесу.

ВИСНОВКИ

Визначено подовження ресурсу пластичності алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc за рахунок термомеханічної обробки при випробуваннях на одновісний розтяг. В результаті, встановлено, що після попередньої пластичної деформації 25 % після одного циклу термомеханічної обробки сумарний ресурс пластичності становив 28 %, після двох циклів – 31,8 %, після трьох циклів – 36,6 %, після чотирьох циклів – 37,4 %, після п'яти циклів – 41,1 %, після шести циклів – 44,6 %. Після попередньої пластичної деформації 50 % після одного циклу термомеханічної обробки сумарний ресурс пластичності становив 26,2 %, після двох – 34,4 %, після трьох – 39,6 %, після чотирьох – 41,3 %. Отже, із збільшенням кількості циклів «Д+ТО» сумарний ресурс пластичності підвищується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2002. 329 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. Москва: Металлургия. 1986. 688 с.
3. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742. *Труды ВИИМ*. 2019. № 8 (80). С. 27–35.
4. Смирнов С.В., Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Исследование пластического разрыхления металла и залечивание деформационных дефектов при отжиге. *Физика металлов и металловедение*. 1980. Т. 49, вып. 2. С. 389–393.
5. Мацевитый В.М., Вакуленко К.В., Казак И.Б. О залечивании дефектов в металлах при пластической деформации (аналитический обзор). *Проблемы машиностроения*. 2012. Т. 15, № 1. С. 66–76.
6. Смирнов С.В., Нестеренко А.В., Швейкин В.П. Определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена в условиях теплой деформации. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11-3. С. 660–664.
7. Жбанов Я.Г., Алиева Л.И., Михалевич В.М. Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2013. № 7. С. 12–17.
8. Матвийчук В.А., Алиев И.С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография. Краматорск: ДГМА. 2009. 268 с.
9. ДСТУ ISO 6892-1:2019. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури. [Чинний від 2020-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 70 с.

REFERENCES

1. Bogatov A. A. Mechanical properties and models of destruction of metals: textbook for universities. Ekaterinburg: State Educational Institution of Higher Professional Education USTU-UPI. 2002. 329 p. (in Russian).
2. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming: a textbook for high schools. Moscow: Metallurgy. 1986. 688 p. (in Russian).
3. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer modeling of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Proceedings of VIAM*. 2019. No. 8 (80). pp. 27–35. (in Russian).
4. Smirnov S.V., Bogatov A.A., Kolmogorov V.L. Study of plastic loosening of metal and healing of deformation defects during annealing. *Physics of metals and metallurgy*. 1980. T. 49, issue. 2. pp. 389–393. (in Russian).
5. Matsevity V.M., Vakulenko K.V., Cossack I.B. On the healing of defects in metals during plastic deformation (analytical review). *Problems of mechanical engineering*. 2012. T. 15, No. 1. pp. 66–76. (in Russian).
6. Smirnov S.V., Nesterenko A.V., Shveikin V.P. Determining relations of damage mechanics for molybdenum under warm deformation. *Fundamental research*. 2012. No. 11-3. pp. 660–664. (in Russian).
7. Zhanov Ya.G., Alieva L.I., Mikhalevich V.M. Restoration of plasticity during isothermal hot fractional deformation. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2013. No. 7. pp. 12–17. (in Russian).
8. Matviychuk V.A., Aliev I.S. Improving the processes of local rotational pressure treatment based on the analysis of metal deformability: monograph. Kramatorsk: DSMA, 2009. 268 p. (in Russian).
9. DSTU ISO 6892-1:2019. Metal materials. Tensile test. Part 1. Test method at room temperature. Kyiv. 2020. 70 p. (in Ukrainian).

Titov A., Koreva V., Tymoshenko O. Assessment of the elongation of the ductility life of a structural aluminum alloy of the Al-Mg-Sc system using thermomechanical processing methods.

A method has been developed and research has been carried out on extending the ductility life of a structural aluminum alloy of the Al-Mg-Sc system by thermomechanical processing using intermediate annealing during deformation processes. Tests were carried out on samples using a tensile scheme. To conduct an experimental study to determine the elongation of plasticity life by thermomechanical treatment, samples from a 2 mm thick sheet of aluminum alloy of the Al-Mg-Sc system were used. The research results are presented for various coefficients of plasticity resource utilization at the i -th transition. The value of the total realized plasticity has been established, reflecting the influence of intermediate heat treatment operations on the plasticity of the alloy after mechanical treatment by deformation. As a result, it was established that the drop in the efficiency of intermediate annealing is explained by the accumulation of metal damage during preliminary deformation. It has been established that intermediate annealing ensures an increase in the plasticity life of the material by 1.5...1.6 times. The dependence of the total realized plastic deformation on the number of "D+HT" cycles, the dependence of the residual plasticity life on the i -th cycle on the number of cycles, and the dependence of the plasticity resource recovery coefficient on the number of "D+HT" cycles are presented. The limiting surface of the dependence of the plasticity of the material on thermomechanical processing and the number of transitions based on the results of a complete study has also been constructed, which determines the plasticity of the material depending on the number of processing cycles "deformation + heat treatment" and allows you to select the parameters of the workpieces at the design stage of the technological process.

Keywords: plasticity resource, structural materials, thermomechanical processing, aluminum alloy, tensile strength..

Тітов Андрій Вячеславович – канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Titov Andrii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NTUU "Igor Sikorsky KPI"

E-mail: Avt.kpi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2245-5650>

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

Koreva Vitalii – Graduate student, NTUU "Igor Sikorsky KPI"

E-mail: koreva85@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2069-1026>

Тимошенко Олександр Вікторович – канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Tymoshenko Oleksandr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NTUU "Igor Sikorsky KPI"

E-mail: timosahadpm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0226-3755>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»), м. Київ

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (NTUU "Igor Sikorsky KPI"), Kyiv