

**Залізняк Р.О.**

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Zalizniak R.**

postgraduate

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.983; 539.374****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-11****МОДЕЛЮВАННЯ І
УДОСКОНАЛЕННЯ
АНІЗОТРОПНОГО ЗМІЦНЕННЯ
ОРТОТРОПНИХ КРИШТАЛЕВИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Листовий матеріал, що піддається штампуванню, як правило, має анізотропію механічних властивостей, обумовлену маркою матеріалу та технологічними режимами його отримання. Анізотропія механічних властивостей матеріалу заготівлі може показувати, як позитивний так і негативний вплив на стійкий перебіг технологічних процесів обробки металів тиском. У процесах пластичного формозмінення початкова анізотропія механічних властивостей змінюється та залежить від режимів обробки.

При аналізі технологічних процесів обробки анізотропних металів тиском нині враховується, переважно, початкова анізотропія механічних властивостей. Облік впливу початкової анізотропії здійснюється в рамках ідеально-пластичного або ізотропного тіла, що зміцнюється. Однак ці припущення не дозволяють оцінити зміну анізотропії механічних властивостей у процесі пластичної обробки.

Більшість існуючих теорій анізотропного зміцнення початково ізотропного та анізотропного тіла засновані на ізотропному розширенні та переміщенні поверхні навантаження у просторі напружень і відрізняються один від одного у підходах до опису переміщення центру поверхні навантаження, які можуть задаватися у вигляді кінцевих і диференціальних співвідношень. Вони розроблені для малих пружнопластичних деформацій..

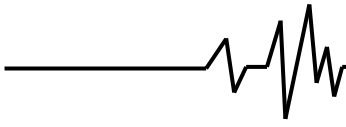
В статті наведено основні співвідношення, які необхідно використовувати при аналізі процесів холодного штампування ортоотропних анізотропно-зміцнювальних матеріалів та запропоновано математичні моделі анізотропного зміцнення ортоотропних кристалічних матеріалів. Як параметри зміцнення використовуються величина інтенсивності деформації та компоненти тензора деформацій в головних осях анізотропії, а також враховується накопичена величина ушкодження.

Ключові слова: ортоотропний матеріал, анізотропне зміцнення, ушкодження, напруга, деформація.

Вступ. Аналіз експериментальних досліджень, наведених у роботах [1 – 5], переконливо доводить зміну цих властивостей. У багатоопераційних технологічних процесах обробки металів тиском слід враховувати зміну анізотропії механічних властивостей при призначенні технологічних параметрів проміжних та остаточних операцій пластичного деформування. Крім того, технічні умови роботи

виробу часто вимагають формування певної анізотропії механічних властивостей деталей.

Найбільшого поширення серед теорій пластичності ортоотропного матеріалу під час аналізу процесів обробки металів тиском знайшла теорія течії анізотропного матеріалу Мізеса – Хілла [5], яка, однак, не враховує анізотропне деформаційне зміцнення матеріалу та не дозволяє оцінити зміну анізотропії



механічних властивостей у процесах пластичного деформування.

Більшість існуючих теорій анізотропного зміцнення початково ізотропного та анізотропного тіла засновані на ізотропному розширенні та переміщенні поверхні навантаження у просторі напружень і відрізняються один від одного у підходах до опису переміщення центру поверхні навантаження, які можуть задаватися у вигляді кінцевих і диференціальних співвідношень. Вони розроблені для малих пружнопластичних деформацій..

Нижче наведено основні співвідношення, які необхідно використовувати при аналізі процесів холодного штампування ортотропних анізотропно-зміцнювальних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Матеріал приймаємо стисливим, жорсткопластичним, ортотропним, котрим справедливий умова плинності Мізеса – Хілла [6]

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

та асоційований закон пластичного перебігу

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_y)]; & d\lambda_{yz} &= d\lambda L\tau_{yz}; \\ d\varepsilon_y &= d\lambda[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)]; & d\lambda_{zx} &= d\lambda M\tau_{zx}; \\ d\varepsilon_z &= d\lambda[G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y)]; & d\lambda_{yx} &= d\lambda N\tau_{xy}, \end{aligned} \quad (2)$$

де F, G, H, L, M, N – параметри, що характеризують поточний стан анізотропії; σ_{ij} – компоненти тензора напруг у головних осях анізотропії; $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\lambda_{yz}, d\lambda_{zx}$ і $d\lambda_{yx}$ – компоненти збільшення тензора деформацій; $d\lambda$ - коефіцієнт пропорційності. Тут x, y, z – головні осі анізотропії.

Параметри анізотропії F, G, H, L, M, N пов'язані з величинами опору матеріалу пластичному деформуванню наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{sx}^2}; & 2L &= \frac{1}{\tau_{syz}^2}; \\ 2G &= \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} - \frac{1}{\sigma_{sy}^2}; & 2M &= \frac{1}{\tau_{syz}^2}; \\ 2H &= \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2}; & 2N &= \frac{1}{\tau_{sxy}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де σ_{sx}, σ_{sy} і σ_{sz} – величини опору матеріалу пластичному деформуванню при розтягуванні в основних осях анізотропії; $\tau_{sxy}, \tau_{syz}, \tau_{syz}$ – величини опору матеріалу пластичного деформування при зрушенні по відношенню до головних осей анізотропії.

Величини коефіцієнтів анізотропії листових матеріалів R_0, R_{45} і R_{90} можуть бути

обчислені через параметри анізотропії F, G, H та N наступним чином:

$$R_0 = H/G; R_{90} = H/F; R_{45} = -\frac{1}{2} + \left(\frac{N}{F}\right)\left(1 + \frac{G}{F}\right); \quad (4)$$

У разі ізотропно-зміцнювального ортотропного тіла Р.Хіллом введені поняття інтенсивності напруг σ_e [49, 52]

$$\sigma_e = \sqrt{3/2[2(F + G + H)]} [F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2]^{1/2} \quad (5)$$

та збільшення інтенсивності деформації $d\varepsilon_e$

$$\begin{aligned} d\varepsilon_e &= \sqrt{\frac{2}{3}(F + G + H)} \left[F \left(\frac{Gd\varepsilon_y - Hd\varepsilon_z}{FG+GH+HF} \right)^2 + \right. \\ & \left. G \left(\frac{Gd\varepsilon_z - Hd\varepsilon_x}{FG+GH+HF} \right)^2 + H \left(\frac{Gd\varepsilon_x - Hd\varepsilon_y}{FG+GH+HF} \right)^2 + \frac{2d\lambda_{yz}^2}{L} + \frac{2d\lambda_{zx}^2}{M} + \frac{2d\lambda_{xy}^2}{N} \right]^{1/2}; \quad (6) \end{aligned}$$

Можна показати, що коефіцієнт пропорційності $d\lambda = 3d\varepsilon_e / (2\sigma_e)$.

Викладення основного матеріалу. Математичні моделі зміцнення анізотропного матеріалу. Серед математичних моделей, що описують зміцнення матеріалу, слід виділити моделі ізотропного, трансляційного та комбінованого зміцнення матеріалу при пластичній формозміні.

Ізотропне зміцнення – найпростіша модель тіла, що зміцнюється. Вона реалізується в припущенні, що поверхня навантаження розширюється подібно до початкової поверхні плинності. У цьому випадку межі плинності зростають пропорційно до одного параметра зміцнення, і стан анізотропії механічних властивостей вихідної заготовки не змінюється [3, 6].

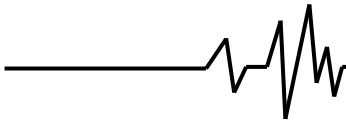
Розглянемо деякі можливі математичні моделі анізотропного зміцнення. Припустимо, що поверхня навантаження не переміщується у просторі напруг, а анізотропно розширюється у всіх напрямках.

Прийmemo, що опору матеріалу пластичному деформуванню у напрямках головних осей анізотропії x, y, z та при зрушенні в головних осях анізотропії підпорядковуються залежностям:

Припустимо, що опору матеріалу пластичному деформуванню у напрямках головних осей анізотропії x, y, z та при зрушенні в головних осях анізотропії підпорядковуються залежностям:

$$\sigma_{sij} = \sigma T_{ii} + F_{ii}(\sigma_i) \cdot F1_{ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i); \quad \tau_{sij} = \tau T_{ij} + F_{ii}(\sigma_i), \quad (7)$$

де σT_{ii} і τT_{ij} – межі плинності у відповідних напрямках; $F_{ii}(\varepsilon_i)$ і $F_{ij}(\varepsilon_i)$ – функції, що залежать від величини інтенсивності деформації ε_i , що визначається за допомогою виразу (6); $F1_{ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i)$ – функції, залежні від величини інтенсивності деформації ε_i та компонент тензора деформацій ε_{ii} в головних



осях анізотропії x, y і z ; i, j приймають значення x, y і z .

Надалі приймаємо, що у разі збігу індексів i та j залишається лише один із них. Слід зазначити, що модель анізотропного зміцнення (7) при $F_{1ij}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i) = 1$ переходить у модель анізотропного зміцнення від інтенсивності деформації ε_i

$$\sigma_i = \sigma_{T_{ii}} + F_{ii}(\varepsilon_i); \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} + F_{ij}(\varepsilon_i), \quad (8)$$

а у разі рівності $F_{1x}(\varepsilon_i)/\sigma_{T_x} = F_{1y}(\varepsilon_i)/\sigma_{T_y} = F_{1z}(\varepsilon_i)/\sigma_{T_z} = F_{xy}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{xy}} = F_{zx}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zx}} = F_{yz}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zy}} = F(\varepsilon_i)$

– модель ізотропного зміцнення виду

$$\sigma_{s_{ij}} = \sigma_{T_{ii}} + [1 + F(\varepsilon_i)]; \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} [1 + F(\varepsilon_i)].$$

Функції $F_{ii}(\varepsilon_i)$, $F_{ij}(\varepsilon_i)$ і $F_{1ii}(\varepsilon_i)$ можуть бути визначені з аналізу системи дослідів на розтягування, стиснення та чистий зсув зразків у головних осях анізотропії у вихідному стані та зразків попередньо деформованих.

Структури функцій $F_{ii}(\varepsilon_i)$, $F_{ij}(\varepsilon_i)$ і $F_{1ii}(\varepsilon_i)$ надалі представимо відповідно у вигляді

$$F_{ii}(\varepsilon_i) = A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}}; F_{ij}(\varepsilon_i) = A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}}; \quad (9)$$

$$F_{1ij}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i) = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^{2 \cdot m_{ij}} \right]; \quad (10)$$

де A_{ii} , A_{ij} , n_{ii} , n_{ij} і m_{ij} – константи матеріалу.

Враховуючи співвідношення (9) та (10), вирази для визначення опору матеріалу пластичному деформуванню (7) можна записати наступним чином:

$$\sigma_{s_{ij}} = \sigma_{T_{ii}} + A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^{2 \cdot m_{ij}} \right]; \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} + A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}}. \quad (11)$$

У ряді випадків за відсутності тієї чи іншої інформації щодо анізотропії механічних властивостей вихідного матеріалу доцільно прийняти

$$F_x(\varepsilon_i)/\sigma_{T_x} = F_y(\varepsilon_i)/\sigma_{T_y} = F_z(\varepsilon_i)/\sigma_{T_z} = F_{xy}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{xy}} = F_{yz}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zy}} = F_{zx}(\varepsilon_i)/\tau_{T_{zx}} = F(\varepsilon_i)$$

тобто

$$n_x = n_y = n_z = n_{xy} = n_{yz} = n_{zx} = n$$

і

$$A_x/\sigma_{T_x} = A_y/\sigma_{T_y} = A_z/\sigma_{T_z} = A_{xy}/\tau_{T_{xy}} = A_{zx}/\tau_{T_{zx}} = A_{yz}/\tau_{T_{zy}} = A,$$

$$\sigma_{s_{ij}} = \sigma_{T_{ii}} \left\{ 1 + A(\varepsilon_i)^n \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^{2 \cdot m_{ij}} \right] \right\}; \tau_{s_{ij}} = \tau_{T_{ij}} [1 + A(\varepsilon_i)^n]. \quad (12)$$

Таке припущення дозволяє значно спростити систему експериментальних досліджень щодо визначення параметрів

кривих анізотропного зміцнення ортотропного матеріалу.

Вибір запропонованих вище моделей зміцнення досліджуваного листового матеріалу здійснюється в такий спосіб. Розглядається найпростіша модель зміцнення анізотропного матеріалу – ізотропного зміцнення. Якщо величини коефіцієнтів анізотропії R_β у дослідях на найпростіше розтягування змінюються менш ніж на 5% у межах рівномірної деформації, то ця модель закладається в основу розрахунку процесів пластичної формозміни. Якщо ця умова не виконується, то аналізується однопараметрична модель анізотропного зміцнення, яка передбачає використання кривих зміцнення у напрямках головних осей анізотропії x, y і z . Якщо ж розраховані величини коефіцієнтів анізотропії R_β з урахуванням виразів (3) та (4) відрізняються від експериментальних більш ніж 5% у межах рівномірної деформації, необхідно переходити на більш складну модель – анізотропного зміцнення (11) (багатопараметричну).

Аналіз напруженого та деформованого станів при пластичній формозміні ізотропних та анізотропних матеріалів зазвичай здійснюється без урахування накопичення пошкоджуваності. Питання про руйнування заготовки у цих випадках, як зазначалося вище, розглядається шляхом лінійного чи нелінійного накопичення пошкоджуваності при пластичній формозміні [7 – 12].

Однак, як показали експериментальні дослідження, пошкоджуваність має місце навіть при малих деформаціях, і, безумовно, вона впливає на напружений та деформований стан заготовки [7 – 9]. У зв'язку з цим доцільно у визначальні співвідношення зміни опору матеріалу пластичному деформуванню (7) вести пошкоджуваність та прийняти відповідно

$$\sigma_{s_{ij}} = [\sigma_{T_{ij}} + F_{ii}(\varepsilon_i) \cdot F_{1ii}(\varepsilon_{ii}, \varepsilon_i)](1 - \omega_e)^k;$$

$$\tau_{s_{ij}} = [\tau_{T_{ij}} + F_{ij}(\varepsilon_i)](1 - \omega_e)^k, \quad (13)$$

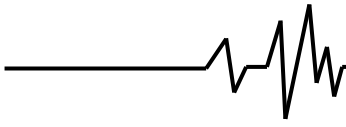
де ω_e – пошкоджуваність матеріалу при пластичній формозміні за деформаційної моделі руйнування, k – константа матеріалу.

У цьому випадку вирази для визначення опору матеріалу пластичному деформуванню з урахуванням співвідношень (13) можна записати так:

$$\sigma_{s_{ij}} = \left\{ \sigma_{T_{ii}} + A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^{2 \cdot m_{ij}} \right] \right\} (1 - \omega_e)^k;$$

$$\tau_{s_{ij}} = [\tau_{T_{ij}} + A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}}] (1 - \omega_e)^k. \quad (14)$$

Введення пошкоджуваності у співвідношення для визначення опору матеріалу пластичному деформуванню значно



ускладнює постановку задачі з аналізу напруженого та деформованого станів та вимагає одночасного розрахунку як компонент напруг, деформацій, величини інтенсивності деформацій, так і пошкоджуваності при пластичній формозміні, однак, дозволить отримати більш правдиву картину деформування.

Висновки. Розроблено варіант теорії пластичності початково ортотропного тіла з анізотропним зміцненням, який заснований на неоднорідному розширенні поверхні навантаження в шестивимірному просторі напруги, пов'язаних з напрямками головних осей анізотропії. Допускається, що поверхня плинності не переміщається у просторі напруги. Як параметри зміцнення використовуються величина інтенсивності деформації ε_i та компоненти тензора деформацій ε_{ii} у головних осях анізотропії x, y і z .

Список використаних джерел:

1. Valiev R. Z. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. *Scripta Materialia*. 2013. № 76. С. 13–16.

2. Polmear I.J. *Light Alloys—Metallurgy of the Light Metals*; Arnold: London. 1995. №1021. С. 22–35.

3. Abdo H.S., Khalil K.A., El-Rayes M.M., Marzouk W.W., Hashem A.M., Abdel-Jaber G.T., Ceramic nanofibers versus carbon nanofibers as a reinforcement for magnesium metal matrix to improve the mechanical properties. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* 2020. №32. С. 346–350.

4. Сивак Р. І. Оцінка пластичності металу та дослідження механіки процесів обробки тиском при комплексному навантаженні. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*. Харків. 2017. № 6/7 (90). С. 34-41.

5. Meshchanov G.I., Peshkov I.B. Innovative approaches in domestic cable engineering. *Electr. Eng.* 2010. № 81. С. 1–8.

6. Telesshov V.V., Andreev D.A., Golovleva A.P. Effect of chemical composition on the strength of alloy of the Al-Cu-Mg-Ag system after heating at 180–210 °C. *Met. Sci. Heat Treat.* 2006. №48. С. 104–112.

7. Hany S. A., Asiful H. S., Jabair A.M., Mahmoud S.S. Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process. *Materials*. 2021 № 14. С. 3971.

8. Almotairy S.M., Alharthi N.H., Alharbi H.F., Abdo H.S. Superior Mechanical Performance of Inductively Sintered Al/SiC

Nanocomposites Processed by Novel Milling Route. *Sci. Rep.* 2020. №10. С. 10368.

9. Fouly A., Almotairy S.M., Aijaz M.O., Alharbi H.F., Abdo H.S. Balanced Mechanical and Tribological Performance of High-Frequency-Sintered Al-SiC Achieved via Innovative Milling Route—Experimental and Theoretical Study. *Crystals*. 2021. №11. С. 700.

10. Veselovska N., Shargorodsky S., Rutkevych V., Iskovych-Lototsky R. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 6/1 (90). P. 60-68. DOI: 10.15587/1729-4061.2017114561 (Scopus / Web of Science).

11. Iskovych-Lototsky R.D., Ivanchuk Y.V., Veselovska N.R., Surtel W., Sundetov S. Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles (Conference Paper). *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2018. Vol.10808. P. 1-10 (Scopus/ Web of Science).

12. Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: монографія. Вінниця: ВНАУ. 2021. 193 с.

References

1. Valiev R. Z. (2013). A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. *Scripta Materialia*. Vol. 76. P. 13–16.

2. Polmear I.J. (1995). *Light Alloys—Metallurgy of the Light Metals*; Arnold: London. Vol. 1021. P. 22–35.

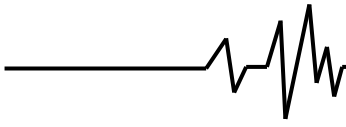
3. Abdo H.S., Khalil K.A., El-Rayes M.M., Marzouk W.W., Hashem A.M., Abdel-Jaber G.T. (2020). Ceramic nanofibers versus carbon nanofibers as a reinforcement for magnesium metal matrix to improve the mechanical properties. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* Vol. 32. P. 346–350.

4. Sivak R. I. (2017). Assessment of metal plasticity and study of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *East European Journal of Entrepreneurial Technologies*. Kharkiv. № 6/7 (90). P. 34-41.

5. Meshchanov G.I., Peshkov I.B. (2010). Innovative approaches in domestic cable engineering. *Electr. Eng.* Vol. 81. P. 1–8.

6. Telesshov V.V., Andreev D.A., Golovleva A.P. (2006). Effect of chemical composition on the strength of alloy of the Al-Cu-Mg-Ag system after heating at 180–210 °C. *Met. Sci. Heat Treat.* Vol. 48. P. 104–112.

7. Hany S. A., Asiful H. S., Jabair A.M., Mahmoud S.S. (2021). Alloying Elements Effects on Electrical Conductivity and



Mechanical Properties of Newly Fabricated Al Based Alloys Produced by Conventional Casting Process. *Materials*. Vol. 14. P. 3971.

8. Almotairy S.M., Alharthi N.H., Alharbi H.F., Abdo H.S. (2020). Superior Mechanical Performance of Inductively Sintered Al/SiC Nanocomposites Processed by Novel Milling Route. *Sci. Rep.* Vol. 10. P. 10368.

9. Fouly A., Almotairy S.M., Aijaz M.O., Alharbi H.F., Abdo H.S. (2021). Balanced Mechanical and Tribological Performance of High-Frequency-Sintered Al-SiC Achieved via Innovative Milling Route—Experimental and Theoretical Study. *Crystals*. Vol. 11. P. 700.

10. Veselovska N., Shargorodsky S., Rutkevych V., Iskovych-Lototsky R. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 6/1 (90). P. 60-68. DOI: 10.15587/1729-4061.2017114561 (Scopus / Web of Science).

11. Iskovych-Lototsky R.D., Ivanchuk Y.V., Veselovska N.R., Surtel W., Sundetov S. Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles (Conference Paper). *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2018. Vol.10808. P. 1-10 (Scopus/ Web of Science).

12. Matviychuk V., Veselovska N., Shargorodsky S. Mathematical modeling of the latest technological systems: monograph. Vinnytsia: VNAU. 2021. P. 193.

MODELING AND IMPROVEMENT OF ANISOTROPIC STRENGTHENING OF ORTHOTROPIC CRYSTALLINE MATERIALS

Sheet material subject to stamping, as a rule, has an anisotropy of mechanical properties due to the brand of the material and the technological modes of its production. The

anisotropy of the mechanical properties of the workpiece material can have both a positive and a negative effect on the steady course of technological processes of pressure metal processing. In the processes of plastic deformation, the initial anisotropy of the mechanical properties changes and depends on the processing modes.

When analyzing the technological processes of processing anisotropic metals by pressure, the initial anisotropy of the mechanical properties is mainly taken into account. Accounting for the influence of the initial anisotropy is carried out within the framework of an ideal plastic or isotropic body that is being strengthened. However, these assumptions do not allow us to estimate the change in anisotropy of mechanical properties during plastic processing.

Most of the existing theories of anisotropic strengthening of an initially isotropic and anisotropic body are based on isotropic expansion and movement of the load surface in the stress space and differ from each other in the approaches to describing the movement of the center of the load surface, which can be specified in the form of finite and differential relations. They are designed for small elastoplastic deformations.

The article gives the main ratios that must be used in the analysis of cold stamping processes of orthotropic anisotropically strengthening materials and proposes mathematical models of anisotropic strengthening of orthotropic crystalline materials. The deformation intensity value and components of the strain tensor in the main axes of anisotropy are used as strengthening parameters, and the accumulated amount of damage is also taken into account.

Key words: *orthotropic material, anisotropic strengthening, damage, stress, deformation.*

Відомості про авторів

Залізник Роман Олександрович – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail:).

Zalizniak Roman Oleksandrovych – graduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail:).