

РОЗДІЛ I МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

УДК 621.735.3

DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)3

Марков О. Є.
Молодецький В. В.
Зінській В. М.
Алдохін М. Д.
Мусорін А. В.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДЛЯ ВРАХУВАННЯ РОЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БАГАТОПЕРЕХІДНОГО ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Технологічні процеси багато перехідного гарячого об'ємного штампування потребують оптимізації технологічних режимів задля зниження силових параметрів процесів деформування. Це обумовлено зниженням енергетичних витрат при серійному виробництві крупногабаритних штампвок масою від 20 до 100 кг. Знизити силові параметри багатоперехідних процесів штампування можливо за рахунок точного встановлення та зниження рівня напружень, які виникають у заготовці під час її деформації. Штампування крупногабаритних поковок у серійному виробництві є дороговартісним процесом, тому ці технологічні процеси вимагають проведення скінчено-елементного моделювання та аналізу напруженого стану металу заготовки та силових режимів деформування на кожному переході. Це моделювання потребує точного визначення напруженого стану заготовки під час штампування. Спираючись на аналіз літератури за останній час було визначено, що основний метод при моделюванні штампування крупногабаритних поковок проводився з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). В основному приділяли увагу змінню форми заготовки у процесі штампування за новими способами та впливу форми деформуючого інструменту на розподіл деформації у тілі заготовки. Відомі програмні комплекси задля моделювання процесів гарячого штампування на основі МСЕ не мають можливості враховувати процеси розміцнення матеріалу, що відбувається при високотемпературній деформації. Це викликано відсутністю моделі, які зв'язує швидкості деформації та компоненти напружень для врахування процесів розміцнення. Облік релаксації внутрішніх напружень дозволить встановити скорегований напружений стан металу заготовки та силові характеристики операцій штампування. У статті представлено, що при розрахунку операцій штампування слід приймати до уваги не тільки процеси зміцнення сталі, але й розміцнення матеріалу, що має місце у процесах гарячого багатоперехідного штампування. На базі пружно-в'язкої моделі Максвелла був визначений зв'язок тензору швидкостей деформації та напружень. Ця модель може враховувати релаксацію внутрішніх напружень. Встановлена аналітична модель була перевірена експериментально на сталі С-60 при температурах гарячого штампування. Доведено, що встановлена модель на 90...95 % відтворює реологію сталі при гарячому штампуванні. Встановлений аналітичний зв'язок тензорів напружень та швидкостей деформації дозволить проводити прямий чисельний розрахунок процесів багатоперехідного штампування без додаткових ітераційних процедур МСЕ. Це дало можливість точніше враховувати дійсні характеристики сталі, що значно знизило чисельність ітерацій, а відповідно і час моделювання.

Ключові слова: штампування, гаряча обробка, напруження, силові параметри, зміцнення, релаксація, МСЕ, крива течії.

При дослідженні МСЕ операцій штампування у гарячому стані виникають труднощі, що пов'язані з нелінійністю характеристик сталі при деформуванні при високих температурах [1, 2]. Основна гіпотеза існуючих методів врахування нелінійності механічних характеристик полягає у рішенні задачі у пружній формі та за рахунок додаткових ітерацій (метод О. А. Ільюшина) вийти на пружно-пластичні характеристики металу, який деформується [3]. Як результат відбудеться збільшення часу розрахунку навіть на ПЕОМ, що знижує можливості МСЕ [4]. Точніше врахування реологічних властивостей сталі що деформується є важливим резервом підвищення точності результатів моделювання переходів гарячого штампування [5].

При гарячому штампуванні сталь зміцнюється, при цьому одночасно проходять процеси рекристалізації, що призводять до релаксації внутрішніх напружень (розміцнення) у сталі під час гарячого штампування [6]. Врахування процесів температурного розміцнення сталі дозволить підвищити технічні показники виготовлення штамповок методами гарячого пластичного деформування [7]. При гарячому багатоперехідному (калібрування, прошивання, протягування) штампуванні з паузами між операціями можна реалізувати штампування з меншими витратами електроенергії [8]. У зв'язку з цим визначення точної реології сталі, яка розміцнюється при гарячій обробці тиском для визначення напружено та відповідно деформованого стану металу заготовки є актуальною проблемою у машинобудуванні [9].

Метою дослідження є розробка аналітичної моделі, яка б відтворювала реологію сталі при гарячому штампуванні, що дозволить підвищити точність встановлення напружено-деформованого стану та силових параметрів при штампуванні масивних поковок.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні задачі:

- винайти математичну модель релаксації внутрішніх напружень у сталі С - 60 при гарячій обробці тиском;
- верифікувати розроблену модель з експериментальною поведінкою сталі при гарячому штампуванні.

При розв'язанні завдань МСЕ слід враховувати дійсний зв'язок між компонентами швидкостей деформації $\{\dot{\epsilon}\}$ та компонентами тензора напружень при різних температурних та швидкісних умовах гарячого деформування. В цьому разі у сталі проявляються в'язкі властивості [10]. Це математичний зв'язок потрібен для визначення матриці жорсткості $[K]$ при SE моделюванні і визначення компонент тензора напружень $\{\sigma\}$ [11]

$$[K]=[B] [D] [B]^T \quad (1)$$

$$\{\sigma\}=[D] \cdot \{\dot{\epsilon}\} \quad (2)$$

Різниця в'язких деформацій твердого тіла від пластичних виражається в тому, що на пластичні чинить вплив швидкість деформування, у тому числі і при високій температурі [12]. Сплав має в'язкі властивості, якщо швидкість деформації є функцією напружень $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon})$. В'язкість проявляється в тім, що після зняття зовнішніх сил внутрішні напруження знижуються у часі. Для операцій штампування, коли разом з процесами зміцнення відбуваються процеси розміцнення сталі, більш точною моделлю, що повніше відтворює реологію, є в'язко-пружна релаксуюча модель Максвелла.

За цією моделлю ступінь деформації, розкладається на пружно $\bar{\epsilon}^e$ та в'язку $\bar{\epsilon}^v$ складову:

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^e + \bar{\epsilon}^v \quad (3)$$

Диференціюючи вираз (3), отримаємо:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^e = \frac{d\bar{\epsilon}^e}{dt} = \frac{d\left(\frac{\sigma_{xx}}{E}\right)}{dt} = \frac{\left(\frac{d\sigma_{xx}}{dt}\right)}{E}; \quad (4)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}^v = \frac{d\bar{\epsilon}^v}{dt} = \frac{\sigma_{xx}}{\nu} \quad (5)$$

Тоді

$$\frac{d\bar{\epsilon}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_{xx}}{dt} + \frac{\sigma_{xx}}{\nu}, \quad (6)$$

де ν – динамічна в'язкість, МПа·с;
 E – модуль пружності Юнга, МПа.

При фіксованій деформації ($\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = 0$) рівняння (6) можна перетворити

$$\sigma = \sigma(0) \exp\left[-\frac{t}{T}\right],$$

де T – час паузи, (с), за який напруження знижуються в $e = 2,718$ разів

$$T = \nu / E, \quad (7)$$

В результаті, можна помітити, що модель Максвелла враховує дійсну реологію сталі при температурах гарячого пластичного деформування, а саме зміцнення при деформуванні та розміцнення під час перекладання заготовки із штампа у штамп. Релаксація призводить до зменшення опору по експонентній залежності, при незмінній деформації [13].

Відносно σ_{xx} при умові, коли час $t = 0$, $\sigma_{xx}^0 = 0$ та якщо тіло деформується зі постійною швидкістю, то рівняння (6) має вигляд

$$\sigma_{xx} = E \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (8)$$

У процесах штампування швидкість деформації не стала [14], тому для розв'язання рівняння (8) слід врахувати функцію зміни ступеня деформації. Ця функція буде зростаючою, так як у процесі штампування ступінь деформації накопичується. Такою функцією може бути зростаюча експонентна функція, (рис. 1)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{T}{A} \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \left(1 - e^{-\frac{At}{T}}\right). \quad (9)$$

Швидкість деформації

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \frac{T}{A} \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \left(-e^{-\frac{At}{T}}\right) \cdot \left(-\frac{A}{T}\right) = \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{-\frac{At}{T}}. \quad (10)$$

За наведеними функціями побудовані графіки зміни ступеня (ε) та швидкості ($\dot{\varepsilon}$) деформації в часі (рис. 1). Вихідними даними для розрахунків були: час паузи (T) становив 2,0 с; швидкість деформації ($\dot{\varepsilon}$) дорівнювала $0,002 \text{ с}^{-1}$; час деформування (t) змінювався від 0 до 6 секунд. Ці вихідні параметри відповідають реальним процесам штампування. А саме, зі збільшенням ступеня деформації відбувається зміцнення матеріалу й збільшення розмірів осередку деформації, що призводить до підвищення зусилля деформування [15]. В результаті по експоненті зменшується швидкість деформації [16].

Для розв'язання неоднорідного рівняння (8) використовуємо метод варіації сталої, замінивши C функцією $\varphi(t)$ та диференціюємо її

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot e^{-\frac{dt}{T}} - \frac{\varphi(t)}{T} \cdot e^{-\frac{dt}{T}}. \quad (11)$$

Після підстановки (11) у рівняння (8) та інтегрування

$$\varphi(t) = \int E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\frac{dt}{T}} dt + C_1. \quad (12)$$

Після підстановки одержуємо

$$\sigma_x(t) = e^{-\int_{t_0}^t \frac{dt}{T}} \left[C_1 + \int_{t_0}^t E \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\int_{t_0}^t \frac{dt}{T}} dt \right],$$

де t_0 і t – границі інтегрування: t_0 – час начала паузи, а t – завершення паузи.

Після перетворень і використання умови $\sigma_{xx}^0 = 0$ отримуємо

$$\sigma_{xx} = E \cdot \varepsilon_{xx} \cdot t \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (13)$$

Проведена математична процедура при $A \rightarrow 1$ не змінила вигляд функцій ступенів й швидкості деформації (рис. 1). Аналіз визначеної моделі (13) дозволив встановити наступні важливі для обробки тиском результати:

– на пік внутрішніх напружень чинить вплив модуля пружності Юнга при температурах гарячого деформування та швидкості деформування;

– максимум функції (13) відповідає часу $T = \nu/E$, тобто це буде час при якому настає пауза (зняття зовнішніх навантажень). Час T слід розраховувати при певних ступенях й швидкостях деформації, які є вихідними параметрами для розв'язання задачі.

Більш цього, модель дозволяє встановити в'язкість ν сталі з використанням співвідношення (7) через добуток $T \cdot E$ або методом перебору. При відомому часі штампування, швидкістю та величиною деформації, підбираємо модуль пружності Юнга до співпадіння значень функції (13) з експериментальними даними. Врахування в'язкості сталі зводиться до визначення значення модуля пружності Юнга від температури.

Рішення цього завдання є простим при відомій діаграмі розтягування або при використанні діаграми зміцнення при різних температурах. Або визначити модуль пружності Юнга можна скориставшись довідковими даними. Модуль пружності Юнга при високих температурах штампування знижується за експонентою.

Зменшення напружень у сталі при паузі, згідно з встановленою моделлю, відбувається по експоненті, а це не суперечить дійсній поведінці сталі після розвантаження.

Для перевірки розробленої моделі реології сталі при гарячому деформуванні необхідно провести експериментальні дослідження і порівняти їх з аналітичною моделлю. В цьому випадку необхідно встановити механічні властивості матеріалу, який деформується. Основні фактори, які впливають на механічні властивості досліджуваного матеріалу: температура, ступінь і швидкість деформації. Досліджувана сталь –С-60. Температура сталевих зразків варіювалась у діапазоні від 800 до 1200°C з кроком 100°C. Ступінь деформації варіювалась від 0 до 0,4, швидкість деформації у діапазоні $(2...6) \times 10^{-3} \text{с}^{-1}$, що охоплює деформаційний і швидкісний режим технологічних процесів штампування. Проводилось планування експериментальних досліджень при використанні плану ПФЕ по типу 3³. Дослідження механічних властивостей сталей при високих температурах проводилися в умовах Донбаської державної машинобудівної академії на установці, що представлена на рисунку 1.

Після проведення експериментальних досліджень і обробки отриманих результатів із застосуванням теорії планування експерименту були встановлені коефіцієнти рівнянь регресії, що визначають залежність опору деформації від ступеня, швидкості деформації та температури. Після виключення незначущих коефіцієнтів отримали

$$\begin{aligned} \sigma_s(\varepsilon, \xi, T) = & 38 + 38 \cdot X_1 + 18 \cdot X_2 - 46 \cdot X_3 + 21 \cdot X_2^2 + 29 \cdot X_3^2 + 39 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 - \\ & - 26 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 - 39 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 - 19 \cdot X_1^2 \cdot X_3^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{де } X_1 = \frac{\varepsilon - 0,1}{0,1}, \quad X_2 = \frac{\xi - 6 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-3}}, \quad X_3 = \frac{T - 1000}{200}.$$

Для порівняння та перевірки теоретичних та експериментальних результатів за

рівняннями (13) та (14) були побудовані залежності опору деформації при деформуванні з паузою при температурах гарячої обробки тиском (рис. 3). Експериментальні данні показані пунктирною лінією, а теоретичні – суцільною лінією.

Співставлення отриманих експериментальних та теоретичних даних підтверджує їх кількісну та якісну відповідність, відмінність складає 5...10 %.

Аналіз отриманих результатів дозволив визначити, що встановлена аналітична модель відтворює реологію сталі С-60, що деформується у гарячому стані, а саме зміцнення та релаксація внутрішніх напружень. На основі встановленої моделі було визначено, що пік напружень можна визначити за модулем пружності Юнга при певній температурі та швидкості деформації при відомому часі деформування. Цей максимум відповідає $T = \nu/E$. Ця залежність наближається до стану, при якому напруження будуть знижуватися до нуля, а експериментальна крива наближається до напруження, яке є границею плинності сталі С-60. Таку відмінність можна пояснити тим, що при експериментальному розтягуванні зразок після деформації залишався під навантаженням, що обумовлене методикою дослідження. В цьому разі напруження не можуть зменшитися до нуля. Різниця теоретичних й експериментальних даних напружень на ділянці релаксації напружень відповідає границі плинності сталі С-60 при заданій температурі. Таким чином, була виявлена причина відмінності теоретичних й експериментальних даних та значень зміцнення й релаксації напружень, що підтверджує, що встановлена модель є прийнятною, тому що вона на 90...95 % повторює реологічну поведінку сталі при гарячому деформуванні.

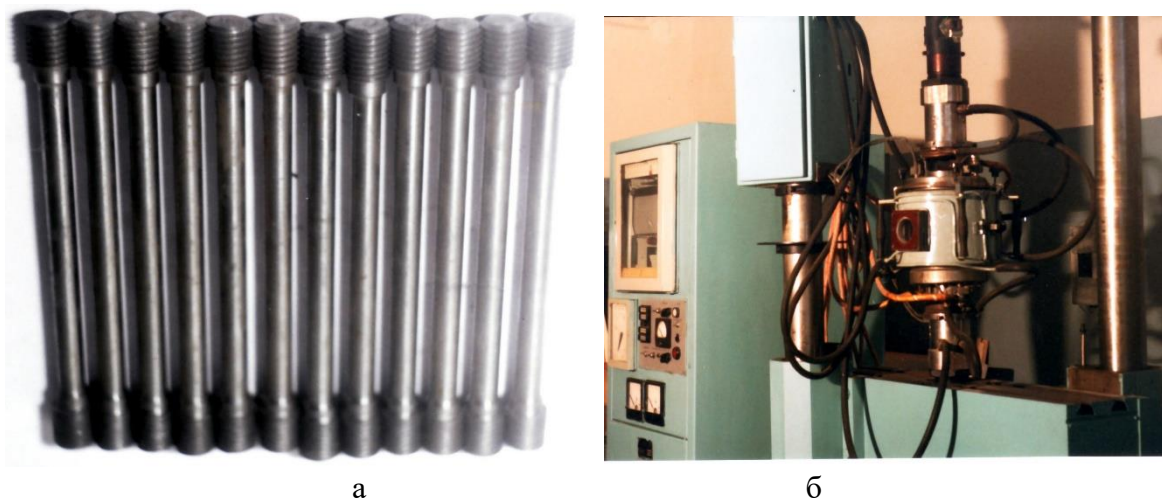


Рис. 1. Зразки (а) та установка (б) для випробувань сталі у гарячому стані

На відміну від відомих способів врахування реологічних властивостей сталі при моделюванні МСЕ розроблена модель дозволяє не проводити додаткові ітераційні перерахунки. Особливістю встановленої моделі зв'язку компонент тензора швидкостей деформацій та тензора напружень при гарячій обробці тиском є врахування релаксації напружень у сталі у паузі між операціями. Це розкриває широкі можливості для її застосування в СЕ моделюванні.

Недоліком даного підходу є потреба вказувати модуль пружності Юнга для певної температури. Цих даних на сьогодні мало у літературі. Крім цього, встановлену модель слід перевірити на інших сталях.

ВИСНОВКИ

На основі в'язко-пружній реологічній моделі Максвелла встановлений зв'язок швидкості деформацій та напружень. Це дозволило встановлювати пряме чисельне розв'язання нелінійної задачі гарячого пластичного деформування при моделюванні методом скінчених елементів з урахуванням дійсних властивостей сталі при температурах гарячої обробки тиском. В результаті використання розробленої моделі реології матеріалу при

деформації в гарячому стані час розрахунку знизився у 4 рази у порівнянні з використанням пружної та пружно-пластичної моделей матеріалу, які використовуються у комерційних програмних продуктах на основі МСЕ за рахунок опору деформації матеріалу для певних термо-швидкісних умов деформування. Розроблена модель враховує не тільки процеси зміцнення матеріалу при деформації, але й розміцнення (релаксацію напружень) в паузі між різними операціями.

Експериментально встановлено опір гарячому деформуванню та релаксацію напружень після деформації сталі С-60 при різних температурах, ступенях та швидкостях деформації. Релаксація напружень після гарячій деформації пояснюється процесами рекристалізації. Отримані результати порівнювалися з теоретичними даними, встановленими на основі розробленої моделі реології матеріалу при гарячій деформації. Експериментально доведено, що розроблена модель на 90...95 % повторює реологію сталі при гарячому деформуванні.

REFERENCES

1. Markov O.E., Zlygoriev V.N., Gerasimenko O.V., Hrudkina N.S., Shevtsov S.A. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5(1-95), pp. 16-24. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>
2. Buckingham R.C., Argyrakis C., Hardy M.C., Biroscu S. The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base super alloy. *Materials Science & Engineering*. 2016. A654, pp. 317–328. <http://doi:10.1016/j.msea.2015.12.042>
3. Ma F., Lu W., Qin J., Zhang D., Ji B. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites. *Mater. and Des.* 2007. 28, pp. 1339–1342. <http://doi:10.1016/j.matdes.2006.02.004>
4. Ma Q., Lin Z., Yu Z. Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2009. 40(3-4), pp. 253-260. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1337-9>
5. Pantalé, O., Gueye, B. Influence of the constitutive flow law in FEM simulation of the radial forging process. *Journal of Engineering*. 2013. Article ID 231847, 8 pp. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>
6. Yunjian, W., Xianghuai, D., Qiong, Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. 93, pp. 102–110. <http://doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>
7. Kukhar V., Burko V., Prysiashnyi A., Balalayeva E., Nahnbida M. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. *East-European Journal of Enterprise Technology*. 2016. 3/7(81), pp. 53–61. <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.72063>
8. Dobrzański L.A., Grajcar A., Borek W. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. 29/2, pp.139-142.
9. Weides G., Blaes N., Bokelmann D. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation. *17 International Forgemasters Meeting*, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008).
10. Erman E., Medei N. M., Roesch A. R., Shah D. C. Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging. *Journal Mechanoc Working Technology* 1989. 19, pp.195–210. [http://doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](http://doi:10.1016/0378-3804(89)90004-1)
11. Markov O.E. et al. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2016. 83(9-12), pp. 2159–2174. <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
12. Kitamura K., Terano M. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. *CIRP Ann - Manuf Techn.* 2014. 63(1), pp. 293-296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>
13. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*. 2012. 42(12), pp. 808 – 810. <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>
14. Mitani Y., Mendoza V., Osakada K. Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic FEM. *Journal Material Processes Technology*. 1991. 27, pp. 137–149. [http://doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](http://doi:10.1016/0924-0136(91)90049-K)
15. Markov O.E. et al. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2017. 90, pp. 801 – 818. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>
16. Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Lysenko, A. FEM study of the drawing method of hollow forgings with a bottom without a mandrel. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 3-9. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)3](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)3) (in Ukrainian).
17. Markov O., Stankov V., Panov V., Zynskyi V. Study of deformation method of hollow workpieces with bottom by dies with chamfer. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 71-78. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)71](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)71) (in Ukrainian).

18. Markov O., Molodetskyi V., Zinskyi V., Abhari P. Experimental study of a new process of deformation of forgings such as sleeves. *Materials Working by Pressure*. 2023. (1(52)), pp. 79-85. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)79](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)79) (in Ukrainian).

Markov O., Molodetskyi V., Zinsky V., Aldokhin M., Musorin A. Development of a model for accounting for steel softening for modeling multi-transition hot stamping processes.

Technological processes of multi-transition hot die forging require optimization of technological modes to reduce the force parameters of deformation processes. This is due to a decrease in energy costs during the serial production of large-sized stampings weighing from 20 to 100 kg. The force parameters of multi-transition stamping processes can be reduced by accurately determining the level of stresses that arise in the workpiece during its deformation. Stamping of large-sized forgings in mass production is an expensive process, therefore technological processes require finite element modeling and analysis of the stress state of the workpiece metal and force deformation modes at each transition. This modeling requires an accurate determination of the stress state of the workpiece during stamping. Based on an analysis of the recent literature, it was determined that the main method for modeling the stamping of large-sized forgings was carried out using the finite element method (FEM). Mainly attention was paid to changing the shape of the workpiece during stamping using new methods and the influence of the shape of the deforming tool on the distribution of deformations in the body of the workpiece. Known software packages for simulating hot stamping processes based on FEM cannot take into account the processes of material hardening that occurs during high-temperature deformation. This is due to the lack of models connecting strain rates and stress components to take into account softening processes. Taking into account the relaxation of internal stresses will allow us to establish the corrected state of the workpiece metal and the power characteristics of stamping operations. The article presents that when calculating stamping operations, one should take into account not only the processes of steel hardening, but also the softening of the material that occurs in the processes of hot multi-transition stamping. Based on Maxwell's elastic-viscous model, the relationship between the strain rate tensor and stress was determined. This model can take into account the relaxation of internal stresses. The established analytical model was tested experimentally on S-60 steel at hot stamping temperatures. It has been proven that the installed model reproduces the rheology of steel during hot stamping by 90...95%. The established analytical connection between stress tensors and strain rates made it possible to carry out direct numerical calculations of multi-junction stamping processes without additional iterative MSE procedures. This made it possible to more accurately take into account the actual characteristics of steel, which significantly reduced the number of iterations and, accordingly, the modeling time.

Keywords: stamping, hot working, stress, power parameters, strengthening, relaxation, MSE, yield curve.

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, зав. каф. АВП ДДМА

Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com

ORCID: [0000-0002-2467-9607](https://orcid.org/0000-0002-2467-9607)

Молодецький Віталій Васильович – аспірант ДДМА

Molodetskyi Vitalii – Graduate student DSEA

E-mail: molvet2876@gmail.com

ORCID: [0000-0002-2690-8354](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

Зінський Володимир Миколайович – аспірант ДДМА

Zinskyi Volodymyr – Graduate student DSEA

E-mail: dolomit.prodam@gmail.com

ORCID: [0000-0002-4145-9665](https://orcid.org/0000-0002-4145-9665)

Алдохін Максим Денисович – аспірант ДДМА

Aldokhin Maksym – Graduate student DSEA

E-mail: maksimaldokhin84@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3187-7521>

Мусорін Антон Володимирович – аспірант ДДМА

Musorin Anton – Graduate student DSEA

E-mail: anton.m.95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4145-9665>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

Стаття надійшла до редакції 12.07.24 р.