

УДК 539.3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І ФОРМОЗМІНЕННЯ МАСИВНИХ І ТОНКОСТІННИХ ОБ'ЄКТІВ

В.А. Баженов,

д-р техн. наук, професор

Ю.В. Максим'юк,

канд. техн. наук, доцент

*Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, Україна. 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.3-12

В роботі наведені результати математичного моделювання процесів формозмінення масивних і тонкостінних тіл обертання під дією вимушених переміщень та неусталених температурних полів при великих незворотніх деформаціях і перемінних граничних умовах. В якості прикладів розглянуті операції витяжки циліндричного стакану і гарячої осадки циліндричної заготовки.

Ключові слова: напружено-деформований стан, формозмінення, вісесиметричні тіла, масивні і тонкостінні об'єкти, неусталене температурне поле, універсальний СЕ, моментна схема скінчених елементів МССЕ, витяжка циліндричного стакану, гаряча осадка циліндричної заготовки.

Вступ. Процеси обробки металів тисненням відзначаються суттєвим формозміненням заготовок під дією пуассонів, штампів і інших інструментів нерідко в умовах нерівномірного нагріву. Крім того, суттєвий вплив на перебіг зміни їх напружено-деформованого стану визначають умови взаємодії з контактуючими тілами. Подальше вдосконалення різноманітних технологічних процесів обробки металів тисненням значною мірою залежить від повноти і достовірності інформації про особливості зміни картини НДС заготовок в процесі деформування. В зв'язку з цим зростає актуальність розробки методів дослідження пластичного формозмінення з урахуванням геометричної нелінійності при великих фізично-нелінійних деформаціях, контактної взаємодії та умов теплообміну на граничних поверхнях.

В даній роботі в якості вихідних, розрахункових співвідношень і алгоритмів розв'язку систем нелінійних рівнянь прийняті наведені в публікаціях авторів [1, 5, 7].

1. Особливості розв'язання нестационарної задачі теплопровідності при формозміненні. В [2, 6] викладена методика визначення нестационарних температурних полів і пов'язаних з ними полів напружень, деформацій і переміщень в геометрично лінійній постановці. Це дозволяло розглядати задачі нестационарної теплопровідності і визначення НДС незалежно. У випадку дослідження процесів суттєвого формозмінення така можливість спрощення організації обчислювального процесу за рахунок його розподілення на два незалежних послідовних етапи відсутня, оскільки обидві задачі пов'язані між собою. На кожному кроці по параметру навантаження розв'язок задачі теплопровідності відбувається в проміжній

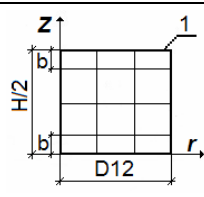
розрахунковій конфігурації з відповідним Δt . Крім того, розміри кроку повинні задовольняти умовам збіжності обох задач.

В якості контрольного прикладу розглянемо сталевий циліндричний зразок висотою $H=300$ мм, нагрітий в початковий момент часу $t=0$ до температури $T=11600^\circ\text{C}$. Стиск зразка проходить зі швидкістю $V=45$ мм/с. Теплофізичні константи матеріалу зразка: питома теплоємність $c=0,166$ Ккал/м \cdot с, коефіцієнт температуропровідності $\lambda=0,2$ м 2 /г. На деформоване тіло накладаються граничні умови теплообміну III-го роду, що найбільш відповідає реальним умовам взаємодії з зовнішнім середовищем: на торцевих поверхнях коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_k=5000$ Ккал/м 2 \cdot г $^\circ\text{C}$; температура зовнішнього середовища $T=2000^\circ\text{C}$; на бокових поверхнях коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_5=5000$ Ккал/м 2 \cdot г $^\circ\text{C}$, температура навколишнього середовища $T=200^\circ\text{C}$. Стиск проходить до 50% початкової висоти зразка. Коефіцієнт тертя на торцях циліндра прийнятий рівним нулю.

Поле температур, визначене в результаті розв'язання задачі теплопровідності, порівнюються з експериментальними і теоретичними результатами, приведені в роботі [4].

Сітка скінчених елементів нанесена на поперечний переріз заготовки таким чином, щоб сіткові координати, паралельні осі Z^2 , відповідали положенню термопар в тілі засовки в експерименті. Виконане дослідження збіжності розв'язання МССЕ згущенням сітки в зоні висотою $b=10$ мм, так як найбільш значні зміни температури в процесі стискання проходять в цій зоні, близькій до торця зразка.

Таблиця 1

|  | N | | | Експеримент [4] |
|--|------------|---------|--------|-----------------|
| | 1 | 2 | 4 | |
| | 9580 | 10220 | 10200 | 9900 |
| | Δt | | | |
| | $t/3$ | $t/7.5$ | $t/15$ | |
| | 10280 | 10230 | 10200 | |

В таблиці 1 наведені результати дослідження збіжності розв'язання при трьох розбивках сіткової області: перший результат отриманий на висоті скінченого елемента $h_i=b$ ($N=1$), другий – $h_i=b/2$ ($N=2$), третій – при $h_i=b/4$ ($N=4$). Результати дослідження показали, що температура в точці I при $N=2$ і $N=4$ мають однакову величину. Також були проведені дослідження впливу кроку по часу. В таблиці 1 t – час осадки заготовки до 50% первинної висоти при сталій швидкості V_0 , Δt – величина кроку по часу, на який розбивається весь процес стиску зразка. Дослідження показали, що крок по часу $\Delta t=t/3$ взятий достатньо точно, так як подальше його зменшення в 2,5 і 5 разів мало впливають на результат. Порівняння температур в точці I після закінчення процесу стискання показали достатньо хорошу збіжність з даними експерименту, наведеному в роботі [4], різниця температур складає порядку 2%.

2. Алгоритм розв'язання контактної задачі зі змінними граничними умовами. В загальному випадку взаємодії об'єктів, що деформуються, з

жорсткою перепною довільної конфігурації необхідне виконання умов примикання і ковзання контактних поверхонь. Це можна забезпечити закріпленням вузлів сіткової області від переміщень, нормальних до поверхні контакту. З цієї метою необхідно ввести систему координат $Z^{i''}$, зв'язану з границею жорсткої перепони. На ділянках, де напрям осей $Z^{i''}$ не співпадає з напрямком осей базисної системи координат $Z^{i'}$ (рис. 1) з'являється необхідність перетворення компонент вектору реакцій в закріплених точках криволінійної ділянки із базисної системи координат в систему координат перепони

$$r^{n''} = R^{m'} C_m^{n''}, \quad (1)$$

де $C_m^{n''}$ - складові тензора перетворень

$$C_m^{n''} = \cos(\hat{n''m'}).$$

Формування матриці системи

розв'язувальних рівнянь відбувається в системі координат $Z^{i'}$. Вираз для варіації енергії в базисній системі координат має вигляд:

$$\delta W = K_{i'j'} U^{i'} \delta U^{j'}, \quad (2)$$

де $K_{i'j'}$ - матриця жорсткості.

Переміщення $U^{i'}$ в базисній системі координат виражаємо через переміщення U^m в системі координат $Z^{i''}$.

$$U^{i'} = U^m C_m^{i'}. \quad (3)$$

Тоді, вираз (2) буде мати вигляд

$$\delta W = \tilde{K}_{n''m''} U^{m''} \delta U^{n''}. \quad (4)$$

Формула для перетворення матриці жорсткості має вигляд

$$\tilde{K}_{n''m''} = K_{i'j'} C_m^{i'} C_n^{j'}. \quad (5)$$

Компоненти вектора переміщень, отримані в результаті вирішення задачі при перетворенні (5), наводяться у базисній системі координат.

Для розв'язку задач контактної взаємодії тіла, що деформується, з жорсткою перепною складної геометричної форми був розроблений алгоритм, який заснований на викладених вище положеннях.

На кожному кроці «n» виконується аналіз напружено-деформованого стану за результатами попереднього «n-1» кроку. За умови непроникнення відбувається закріплення окремих вузлів, в загальному випадку, що відрізняється від можливого закріплення вузлів на «n» кроці. У зв'язку з цим здійснюється пробна ітерація, після якої виконується перевірка реакцій в закріплених вузлах. Якщо останні змінюють знак на протилежний, вузли

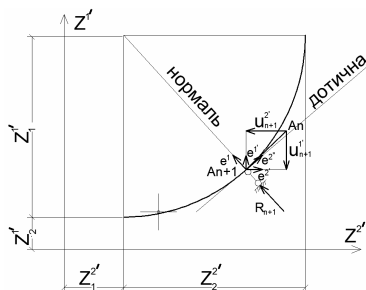


Рис. 1

відкріпляються. Після цього рішення на « n » кроці повторюється знову, але вже з відкоригованими вузлами.

Розглянемо, наприклад, умови контакту об'єкту, що взаємодіє з жорсткою перепоною з довільною формою границі (рис. 1).

Точка A_{n+1} закріплюється в тому випадку, якщо вона буде знаходитися в середині перепоны, якщо

$$A_{n+1} \in B, \quad U_{n+1}^1 = 0, \quad (6)$$

де B – область обмежена прямими $Z^1 = Z_2^1$, $Z^2 = Z_1^2$ і кривою $f(Z^1, Z^2) = 0$.

Відкріплення точок, контактуючих з жорсткою перепоною відбувається за умови

$$\left. \begin{array}{l} R_n^1 < 0 \\ R_n^2 > 0 \end{array} \right\} U_{n+1}^1 \neq 0; \quad (7)$$

у випадку, коли

$$\left. \begin{array}{l} R_n^1 \geq 0 \\ R_n^2 \leq 0 \end{array} \right\} U_{n+1}^1 = 0 \quad (8)$$

вузол залишається закріпленим.

Такий підхід дозволяє своєчасно відкріпляти вузли, користуючись інформацією про реакції, що виникають на даному кроці, а не на попередньому. Проте перерозподілення умов закріплення вузла призводить до повторного обчислення коефіцієнтів матриці жорсткості на кожному кроці, що збільшує час розрахунку.

З метою зменшення часу розрахунку був апробований алгоритм, виключаючий проведення пробної ітерації: за результатами попереднього кроку здійснюється закріплення, після чого розв'язання продовжується за описаним вище алгоритмом розв'язання фізичних нелінійних задач. Після цього, вже за результатами кроку « n » аналізуються реакції в закріплених вузлах, і, за необхідності, виконується закріплення. За цим алгоритмом відбувається запізнювання корекції зміщення на крок, в наслідок чого в сусідніх закріплених вузлах виникає пара сил, дія якої є суттєвою для кроку, який розглядається. На наступному « $n+1$ » кроці відкріплений вузол починає рухатися. Невідповідність моделі до реальних умов руху точок тіла, що деформується, вздовж границі жорсткої перепоны усувається. Достовірність викладеного підходу обґрунтовано розв'язанням контрольного прикладу наведеного в роботі [3].

3. Витяжка циліндричного стакану. Витяжка циліндричного стакану відбувається за допомогою матриці, прижиму і пуасона, який тисне на середню частину заготовки у вигляді круглої пластини (рис. 2 (а)).

Глибина витяжки стакану, як правило, обмежується його розривом в місці, де локалізуються найбільші розтягуючі меридіональні напруження (σ_{22}) рис. 2 (б).

Мета дослідження полягає у вивченні характеру зміни меридіональних і окружних напружень, що виникають у віссиметричній заготовці в процесі її деформування, аналізу зусиль витяжки P , умов контакту з матрицею і пуасоном, які змінюються в процесі деформування, дослідження впливу зміни радіуса закруглення матриці і пуасона, її напружено-деформований стан.

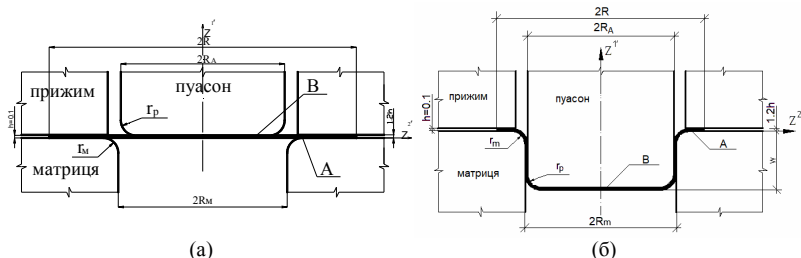


Рис. 2

Механічні характеристики матеріалу заготовки відповідають сталі типу Ст.10. Відношення радіусу отвору матриці R_m до початкового радіусу круглої пластини R дорівнює 0,583, відношення товщини пластини h до R становить 0,004. Зажим між прижимом і матрицею дорівнює 1,2. Радіус закруглення r матриці і пуасона однакові і становить $5h$. Оскільки, витяжка реалізується із застосуванням мастила, тертям можна знехтувати. Розв'язок задачі виконується у віссиметричній постановці, тому що наявність прижиму виключає можливість складкоутворення і локальну втрату стійкості. По товщині пластини достатньо використовувати один універсальний СЕ. По довжині пластини вздовж радіусу використовується 80 СЕ, що забезпечує апроксимацію округлень матриці і пуасона приблизно 10 СЕ.

Моделювання процесу витяжки здійснювалось до глибини W , на якій досягаються максимальні значення зусиль витяжки P . Як правило, максимальні значення P фіксується після того, як відбувається обхват матеріалом заготовки зкруглених кромки матриці пуасона. При цьому відбувається поступове закріплення точок, які входять в контакт зі зкругленими кромками матриці і пуасона, а також з горизонтальною площиною прижима. На рис. 3 схематично показана зміна умов контакту заготовки з інструментом на різних етапах деформування.

Дослідження впливу величини зкруглення матриці та пуасона r на основні параметри напруженого стану заготовки проводилося в діапазоні зміни r від $5h$ до $9h$. Графіки зміни зусилля витяжки P при деформуванні заготовки представлені на рис. 4 (а).

Максимальні зусилля P в усіх 3-х випадках відповідають

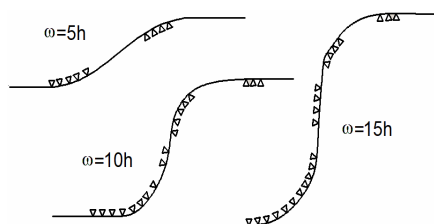


Рис. 3

моменту появи вертикальної стінки стакану. Виявилось, що величина P_{max}

змінюється при збільшенні радіусу зкруглення r на 7,5% при $r=7h$ і на 14% при $r=9h$ порівняно із значення $P_{max}=5h$.

На рис. 4 (б) представлені графіки зміни меридіональних напружень, їх згинної та мембранної складових в залежності від величини радіусу зкруглення r . Встановлено, що зростання меридіональних напружень σ_{22} при зменшенні r від 9 до $5h$ відбувається тільки за рахунок збільшення складових згину σ_{22} . Мембранна складова σ_{22} залишається практично незмінною при всіх досліджуваних значеннях радіусу r .

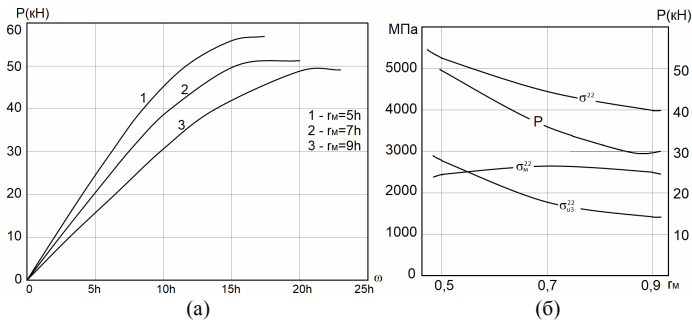


Рис. 4

Таким чином проведені чисельні дослідження дозволили зробити висновок, що зміна геометрії інструмента незначною мірою впливає на величину зусилля витяжки P_{max} , проте суттєво впливає на величину максимальних меридіональних напружень.

4. Осадка заготовки з урахуванням впливу температури інструменту. Великий вплив на напружено-деформований стан заготовок, що осаджуються має температура преса, яка, як правило, в декілька разів менше температури деталі, що піддається обробці. Від температури преса, від швидкості відведення тепла з дотичних торців оброблюваних заготовок залежить характер зміни фізико-механічних характеристик матеріалу і, отже, зміни напружено-деформованого стану об'єкту.

Проведемо дослідження впливу температури матеріалу плити преса на деякі параметри напруженого стану заготовок. Розглянемо циліндричну заготовку нагріту до температури $T_0=1200^{\circ}\text{C}$. Передбачається, що тертя на поверхні контакту заготовка-інструмент відсутня.

Теплофізичні характеристики матеріалів заготовок мають таке значення: коефіцієнт теплоємності $c=0,245$ ккал/кг \cdot с коефіцієнт теплопровідності $\lambda=0,058$ ккал/см \cdot С, питома вага матеріалу $\gamma=7870$ кг/см 3 . Оскільки процес гарячої осадки циліндричної заготовки моделюється при зовнішніх умовах, максимально наближених до реальних, на деформоване тіло накладаються два процеси теплопередачі: через контактну поверхню інструмент - деформоване тіло (коефіцієнт теплопровідності $\lambda_T=5000$ ккал/м 2 ч $^{\circ}\text{C}$) і через бічні поверхні заготовки за рахунок випромінювання і конвекції (коефіцієнт теплопровідності $\lambda_T=150$ ккал/м 2 ч $^{\circ}\text{C}$). Температура середовища $T_{cp.}=20^{\circ}\text{C}$. Дослідження

впливу температури матеріалу плити преса проводилося при трьох значеннях $T_1=100^\circ\text{C}$, $T_2=300^\circ\text{C}$, $T_3=500^\circ\text{C}$.

На рис. 5 наведені ізолінії розподілення температури в меридіональному перетині заготовки при рівні осадки $H/H_0=0,53$ і температурі преса 100 і 500 градусів. Очевидно, що збільшення температури преса вирівнює розподілення температури по висоті заготовки в приграничній зоні.

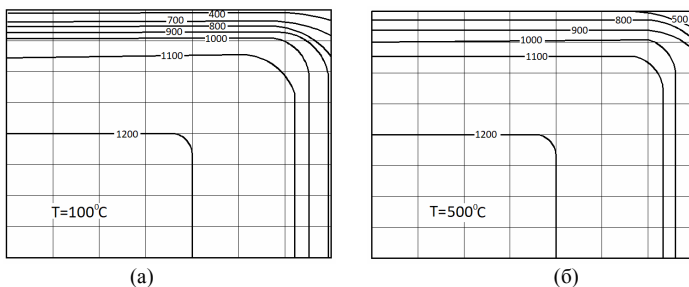


Рис. 5

Виявилося, що на характер зміни зусилля деформування заготовки збільшення температури інструменту практично не впливає. Це пояснюється тим, що охолодженню піддається тільки поверхневий шар, об'єм якого в порівнянні з усім тілом становить 5%.

Стискаючі окружні напруження, що виникають у верхній частині бокової поверхні заготовки при її охолодженні, призводять до збільшення кривизни поперечного перерізу. При цьому форма бічної поверхні наближається до бочкоподібної.

Зміна температури плити преса суттєво впливає на розподіл і рівень окружних напружень $\sigma^{3'3'}$ по перерізу заготовки. Аналіз результатів, представлених на рис. 6 і рис. 7 у вигляді ізолінії $\sigma^{3'3'}$ за поперечним перерізом показав, що зменшення температури преса призводить до зростання напружень $\sigma^{3'3'}$ як в зоні стискаючих напружень, так і в зонах розтягувальних напружень. При цьому виявилося, що на розміри зон розтягуючих напружень зменшення температури по контактній поверхні не має практично ніякого впливу.

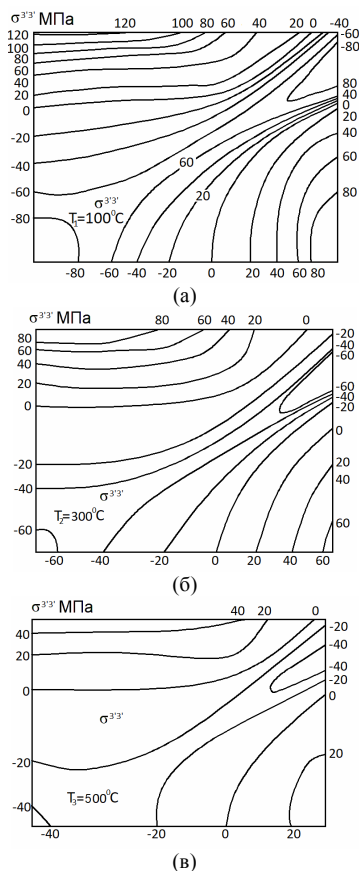


Рис. 6

На рис. 7 представлена епюра колових напружень по боковій поверхні деформування заготовки до $H/H_0=0,53$ при різних температурах плити преса. Стискаючі окружні напруження, що виникають у верхній частині заготовки при її охолодженні, призводять до збільшення конусності поперечного перерізу і, отже, до виникнення і зростання розтягуючих напружень в центральній частині. При цьому форма бічної поверхні наближається до бочкоподібної, також як при терті.

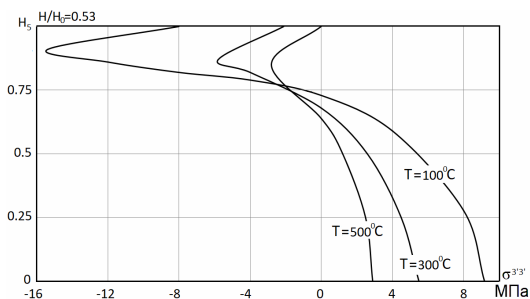


Рис. 7

Таким чином, чисельні дослідження процесу осадки циліндричної заготовки показали, що зміна умов теплообміну між ними призводить до більш нерівномірного характеру розподілу напружень по поперечному перетину заготовки, розширенню зони розтягуючих окружних напружень, зростанню величини останніх, що може позначитися на якості виробів, що виготовляються.

Висновок. Наведені вище результати розрахунків технологічних процесів дають підставу зробити висновок, що розроблена методика і реалізуючий її програмний комплекс, дозволяють проводити дослідження формозмінення оболонкових, масивних вісесиметричних конструкцій з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності при силовому і нестационарному температурному навантаженнях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А.* Особливості використання моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) при нелінійних розрахунках оболонок і пластин / В.А. Баженов, О.С. Сахаров, О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. - Вип.92. – С. 3-16.
2. *Гуляр О.І.* Алгоритм розв'язання вісесиметричних задач нестационарної теплопровідності / О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк, В.П. Андрієвський, С.В. Мицюк // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / Відп. ред. В.А.Баженов. –К.:КНУБА, Вип.95, 2015. С. 11-20.
3. *Гуляр О.І.* Дослідження нелінійного деформування складених оболонок обертання середньої товщини / О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк // Технічні науки та технології : науковий журнал. Чернівці: ЧНТУ, 2(12), 2018. С 9-24.
4. *Каракина А.А.* Определения температурного поля при деформации / А.А. Каракина, В.И. Тарновский, А.В. Иванецкий и др. // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1966, № 8, с.122-127.
5. *Максим'юк Ю.В.* Индиферентність тензорів деформацій, напружень та їх прирощень при умові енергетичної сполученості. / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. - Вип.99. – С. 151-159.
6. *Максим'юк Ю.В.* Скінчений елемент загального типу для розв'язку вісесиметричної задачі нестационарної теплопровідності / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / Відп. ред. В.А.Баженов. –К.:КНУБА, Вип.96, 2015. С. 148-157.
7. *Максим'юк Ю.В.* Постановка задачі про вплив геометричної нелінійності на несучу здатність і закритичну поведінку тонкостінних та комбінованих вісесиметричних тіл. / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / Відп. ред. В.А.Баженов. –К.:КНУБА, Вип.97, 2016. С. 186-193.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A.* Osoblivosti vikoristannya momentnoyi shemi skinchenih elementiv (MSSE) pri neliniynih rozrahunkah obolonok i plastin (Peculiarities of using the finite element moment scheme (FEMS) in nonlinear calculations of shells and plates)/ V.A. Bazhenov, O.S. Saharov, O.I. Gulyar, C.O. Piskunov, Yu.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teoriya sporud.* – 2017. - Vip.92. – S. 3-16.
2. *Gulyar O.I.* Algoritm rozv'yazannya visesimetrichnih zadach nestatsionarnoyi teploprovodnosti (An algorithm for solving the axiomatic problems of non-stationary heat conductivity) / O.I. Gulyar, S.O. Piskunov, Yu.V. Maksymyuk, V.P. AndriEvskiy, S.V. Mitsyuk // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tehn. zbirnik / Vidp. red. V.A.Bazhenov.* –K.:KNUBA, Vip.95, 2015. C. 11-20.
3. *Gulyar O.I.* Doslidzhennya neliniynogo deformuvannya skladenih obolonok obertannya serednoyi tovschini (Investigation of nonlinear deformation of composite shells of rotation of middle thickness) / O.I. Gulyar, S.O. Piskunov, Yu.V. Maksymyuk // *Tekhnichni nauki ta tehnologiyi : naukoviy zhurnal.* Chernigiv: ChNTU, 2(12), 2018. S 9-24.
4. *Karakina A.A.* Opredeleniya temperaturnogo polya pri deformatsii (Determination of the temperature field during deformation) / A.A. Karakina, V.I. Tarnovskiy, A.V. Ivanitskiy i dr. // *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1966, # 8, s.122-127.
5. *Maksymyuk Yu.V.* Indiferentnist tenzoriv deformatsiy, napruzen ta yih priroschen pri umovi energetichnoyi spoluchenosti. (The indifference of tensors of deformations, stresses and their increments under the condition of energy interconnection) / Yu.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teoriya sporud.* – 2017. - Vip.99. – S. 151-159.
6. *Maksymyuk Yu.V.* Skincheniy element zagalnogo tipu dlya rozv'yazku visesimetrichnoyi zadachi nestatsionarnoyi teploprovodnosti (A finite element of general type for the solution of an axisymmetric problem of non-stationary heat conductivity) / Yu.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tehn. zbirnik / Vidp. red. V.A.Bazhenov.* –K.:KNUBA, Vip.96, 2015. C. 148-157.
7. *Maksymyuk Yu.V.* Postanovka zadachi pro vplyv heometrychnoi neliniynosti na nesuchu zdattist i zakrytychnu povedinku tonkostinnykh ta kombinovanykh visesymetrynykh til. (Statement of the problem of the influence of geometric nonlinearity on the bearing capacity and the supercritical behavior of thin-walled and combined axisymmetric bodies) / Yu.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk / Vidp. red. V.A.Bazhenov.* –K.:KNUBA, Vyp.97, 2016. C. 186-193.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2018 р.

Bazhenov V.A., Maksymyuk Yu.V.

STRESS-STRAIN STATE AND FORM-CHANGING OF MASSIVE AND SIMPLE OBJECTS

The paper presents the results of the mathematical modeling of the processes of the transformation of massive and thin-walled bodies of rotation under the action of forced displacements and unstopable temperature fields with large irreversible deformations and variable boundary conditions. As examples, operations of extracting cylindrical glass and hot precipitations of cylindrical work are considered.

The processes of processing of metals by stamping are marked by a significant change in the workpieces under the action of poisons, stamps and other tools, often in conditions of uneven heating. In addition, the conditions of interaction with contacting bodies determine the significant influence on the course of change in their stress-strain state. Further improvement of various technological processes of metal processing by embossing to a large extent depends on the completeness and reliability of information on the peculiarities of changing the picture of the VAT of the workpieces in the process of deformation. In this connection, the urgency of the development of research methods for plastic molding, taking into account geometric nonlinearity with large physical-nonlinear deformations, contact interaction and heat transfer conditions on the boundary surfaces, is increasing.

In this paper, as output, settlement relationships, and algorithms for solving nonlinear equations systems are taken in the publications of the authors [1, 5, 7].

The results of the calculations of technological processes presented in this paper give the basis to conclude that the developed method and implementing its software complex, allow to conduct studies on the modification of shell, massive axisymmetric constructions, taking into account geometric and physical nonlinearity in power and non-stationary temperature loads.

Keywords: stress-deformed state, form-modification, axial-symmetric bodies, massive and thin-walled objects, unverified temperature field, universal FE, moment diagram of finite elements (FEMS), extractor of cylindrical glass, hot draft of cylindrical workpiece.

Баженов В.А., Максимюк Ю.В

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МАССИВНЫХ И ТОНКОСТЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В работе приведены результаты математичного моделирования процессов формоизменения массивных и тонкостенных тел вращения под действием вынужденных перемещений и неусталенных температурных полей при больших необратимых деформациях и переменных граничных условиях. В качестве примеров рассмотрены операции вытяжки цилиндрического стакана и горячей осадки цилиндрической заготовки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, формоизменения, осесимметричные тела, массивные и тонкостенные объекты, неусталенное температурное поле, универсальный СЕ, моментная схема конечных элементов (МССЕ), вытяжка цилиндрического стакана, горячая осадка цилиндрической заготовки.

УДК 539.3

Баженов В.А., Максим'юк Ю.В. **Напружено-деформований стан і формозмінення масивних і тонкостінних об'єктів** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 3-12.

В роботі наведено результати математичного моделювання процесів формозмінення масивних і тонкостінних тіл обертання під дією вимушених переміщень та неусталених температурних полів при великих незворотних деформаціях і перемінних граничних умовах. В якості прикладів розглянуті операції витяжки циліндричного стакану і гарячої осадки циліндричної заготовки.

Табл. 1. Іл. 6. Бібліогр. 7 назв.

UDC 539.3

Bazhenov V.A., Maximyuk Yu.V. **Stress-strain state and form-changing of massive and thin-walled objects** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 102. – P. 3-12.

The paper presents the results of the mathematical modeling of the processes of the transformation of massive and thin-walled bodies of rotation under the action of forced displacements and unstopable temperature fields with large irreversible deformations and variable boundary conditions. As examples, operations of extracting cylindrical glass and hot precipitations of cylindrical work are considered.

Tabl. 1. Fig. 6. Ref. 7.

Баженов В.А., Максимюк Ю.В. **Напряженно-деформированное состояние и формоизменения массивных и тонкостенных объектов.** // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2019. - Вип. 102. - С. 3-12.

В работе приведены результаты математичного моделирования процессов формоизменения массивных и тонкостенных тел вращения под действием вынужденных перемещений и неусталенных температурных полей при больших необратимых деформациях и переменных граничных условиях. В качестве примеров рассмотрены операции вытяжки цилиндрического стакана и горячей осадки цилиндрической заготовки.

Табл. 1. Ил. 6. Библиогр. 7 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, академік Національної академії педагогічних наук України, завідувач кафедри будівельної механіки **БАЖЕНОВ Віктор Андрійович**

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, **БАЖЕНОВУ Віктору Андрійовичу**

Робочий тел.: +38(044) 245-48-29;

E-mail: vikabazh@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5802-9848>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки **МАКСИМ'ЮК Юрій Всеволодович**

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, **МАКСИМ'ЮКУ Юрію Всеволодовичу**

Робочий тел.: +38(044) 241-55-38;

Мобільний тел.: +38(067) 230-94-72;

E-mail: maximvuk@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5814-6227>