

УДК 621

## АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РІЗКИ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ НА ЗАГОТОВКИ

Савченко Д.М., Петришин А.І., Холявік О.В., Борис Р.С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** Різні способи отримання деталей та напівфабрикатів з тонкостінної трубчастої заготовки мають суттєві недоліки при їх реалізації [1-5]. А саме: втрата металу на прорізний шар, наявність зони термічного впливу, досить низька продуктивність, що як правило суттєво проявляється у масовому та серійному виробництві. У даній роботі розглянуто найбільш перспективний та прогресивний спосіб отримання напівфабрикатів та деталей з тонкостінних трубчастих заготовок – різка у штампах чистим зсувом на пресах. У роботі розглянуто аналітичне визначення параметрів процесу різки тонкостінних труб на заготовки.

**Ключові слова:** різка, тонкостінні трубчасті заготовки, заготовки, напівфабрикати.

Результати досліджень. Конструкція експериментального пристрою для дослідження процесу різки тонкостінних труб на заготовки складається з двох пар оправок [4].

При обертанні оправок навколо нерухомої осі, яка одночасно являється віссю симетрії тонкостінної трубчастої заготовки, внутрішні оправки разом з деталлю, що відрізається, зміщуються паралельно площині зрізу [4]. Визначальним являється те, що напрямок зміщення безперервно змінюється у процесі обертання зовнішніх оправок, що унеможливує накопичення мікротріщин та руйнування сколом при фіксованих лініях ковзання, що характерні для незмінного напрямку зсуву.

Зазор між внутрішньою і зовнішньою парами оправок дорівнює товщині стінки тонкостінної трубчастої заготовки з урахуванням допуску на товщину та співвідношення внутрішнього і зовнішнього контуру поперечного перерізу.

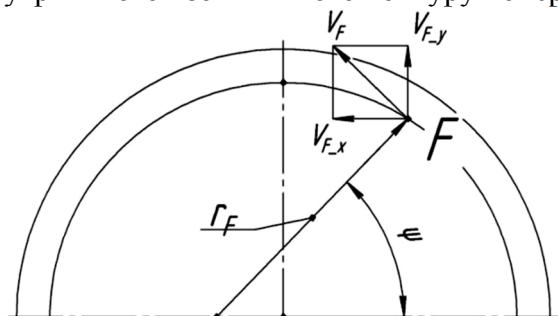


Рис. 1 - Визначення швидкості точки на країці інструменту.

Оправки внутрішньої і зовнішньої пар притискаються у процесі відрізки у площині зрізу завдяки чому виключається гнуття заготовки, що відрізається. В результаті зміщення оправок на заготовці утворюються два серпоподібні надрізи, розміри і форма яких залежить від кута повороту. Зі збільшенням кута повороту площа зрізаних ділянок зростає. Для визначення положення інструменту відносно заготовки авторами запропоновано ввести кілька систем

координат. А саме: першого та другого інструментів, а також система координат заготовки, які являються співвідносними [4]. Щоб розрахувати положення кромки інструменту відносно заготовки, яке визначається характерними точками, авторами роботи запропоновано записати для характерних точок радіус-вектор положення у рухомій системі координат одного з інструментів.

Кожна характерна точка належить одночасно і внутрішній кромці інструменту і внутрішній кромці заготовки, що дозволяє записати систему рівнянь для кожної характерної точки. Розв'язавши дану систему рівнянь, можна знайти кути, які визначають положення кожної характерної точки на кромках інструменту та заготовки.

Для визначення швидкості довільної точки інструменту, положення якої на кромках заготовки характеризується кутом  $\psi$ , для початку необхідно знайти її радіус-вектор.

$$r_F = A^6(\varphi) \cdot A^1(e) \cdot A^6(\psi) \cdot A^1(r) \cdot e^4 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & r_{ен} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e \cdot \cos(\varphi) + r \cdot \cos(\varphi + \psi) \\ e \cdot \sin(\varphi) + r \cdot \sin(\varphi + \psi) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Тоді її швидкість визначається за залежністю:

$$V_F = \frac{\partial r_F}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \begin{pmatrix} -r \cdot \sin(\varphi + \psi) - e \cdot \sin(\varphi) \\ r \cdot \cos(\varphi + \psi) + e \cdot \cos(\varphi) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times \omega = \begin{pmatrix} V_{F-x} \\ V_{F-y} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

Абсолютна швидкість даної точки визначається за залежністю:

$$V_F = \sqrt{V_{F-x}^2 + V_{F-y}^2} \quad (3)$$

Для визначення швидкості в певній точці інструменту необхідно у дану залежність підставити значення кута  $\psi_i$ , який відповідає положенню точки інструменту у системі координат S1.

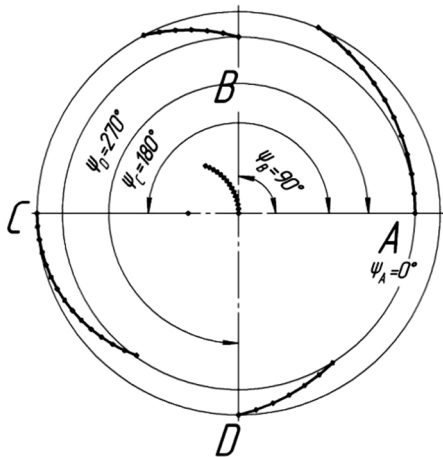


Рис. 2 - Положення характерних точок

Для прикладу, на Рис. 2. Наведено положення точок А ( $\psi_A = 0$ ), В ( $\psi_B = 90$ ), С ( $\psi_C = 180$ ), D ( $\psi_D = 270$ ):

Таким чином, аналізуючи вказані залежності можна зробити висновок, що для точки А положення інструменту, при якому вертикальна складова  $V_y$  буде змінювати напрямок на протилежний знаходиться у точці, в якій  $V_y = 0$ . Для точок А, В, С, D положення інструменту, які відповідають цій умові становлять: точка А –  $\varphi = 90^\circ$  та  $\varphi = 270^\circ$ , точка В –  $\varphi = 16^\circ$  та  $\varphi = 196^\circ$ , точка С –  $\varphi = 90^\circ$  та  $\varphi = 270^\circ$ , точка D –

$\varphi = 166^\circ$  та  $\varphi = 346^\circ$

Після того, як для певної точки вертикальна складова змінює свій напрямок, умови відрізання будуть визначатись не вертикальною складовою швидкості, а напрямком і величиною абсолютної швидкості точки інструменту.

Тому у подальшому необхідно побудувати графік зміни абсолютної швидкості точки після того, як зміняться умови різання.

Аналітичне визначення положення інструменту, у якому вертикальна складова швидкості певної точки змінює знак можна знайти з умови:

$$V_y = (r \cdot \cos(\varphi + \psi_i) + e \cdot \cos(\varphi)) \times \omega = 0 \quad (4)$$

звідки маємо:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{r \cdot \cos(\psi_i) + e}{r \cdot \sin(\psi_i)}\right) \pm \pi \cdot i, \text{ де } i = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

На основі залежності (5) можна побудувати графіки для внутрішньої крайки інструменту. Наприклад, для точки на зовнішній крайці інструменту точка  $G$  з  $\psi_i = 242^\circ$  вертикальна складова швидкості  $V_y$  буде рівна нулю при куті повороту інструменту  $\varphi = 13.92^\circ$  (Рис. 3.).

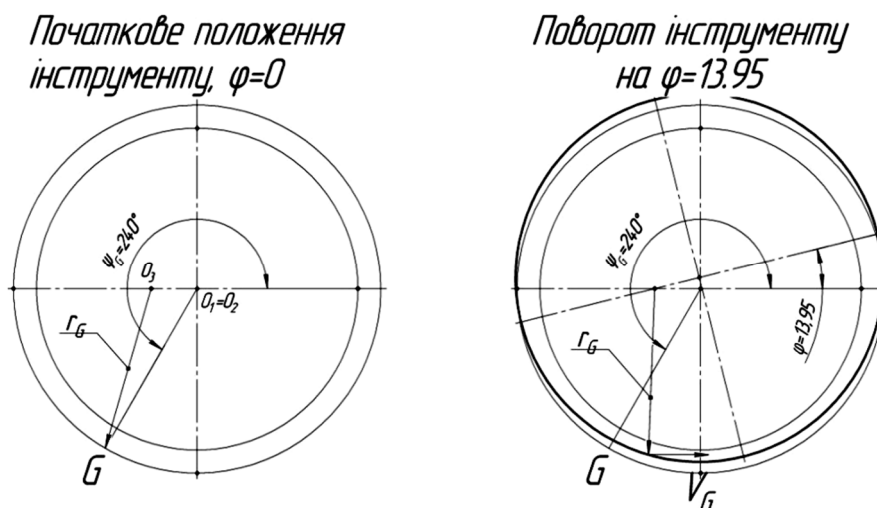


Рис. 3 - Визначення швидкості точки на крайці інструменту

Висновки. У роботі для процесу відділення заготовки від трубчастого напівфабрикату методом відрізки тонкостінних трубчастих заготовок за допомогою двох пар оправок запропоновано використання трьох співвісних систем координат. Визначено закон руху будь-якої точки інструменту, визначена функція переміщення характерних точок перетину. Також запропоновано визначення швидкості будь-якої точки за допомогою її горизонтальної та вертикальної складових. Це дозволяє визначити деформації точок по відношенню до радіус-вектора, швидкості деформацій та їх складові.

#### Список літератури:

1. Соловцев С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцев - М.: Машиностроение, 1985.-176 с.
2. Веселовский С.И. Разрезка материалов. - М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
3. №46319 В21D37/00 Способ получения короткой трубчатой заготовки; Авторы: Стеблюк Владимир Иванович, Савченко Дмитрий Николаевич, Розов Юрий Георгиевич, Азарх Илья Павлович, 10.12.2009р. Бюл.№23.
4. Стеблюк В.И., Савченко Д.Н., Шкарлута Д.Б. Последовательность резки тонкостенной трубчатой заготовки сдвигом вращающихся оправок // Вестник национального технического университета Украины «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. – Харьков: ХТУ «ХПИ» - 2010. - №43. – С. 141-146.
5. Стеблюк В.И., Савченко Д.Н., Розов Ю.Г., Холявик О.В. Экспериментальные исследования усовершенствованного метода резки трубчатых заготовок одновременным сдвигом и кручением // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. - №1(22). – С. 179-182.

УДК 621.983

## СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ЗДЕФОРМОВАНИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ВИТЯГУВАННІ В РАДІАЛЬНІЙ ТРАДИЦІЙНІЙ МАТРИЦІ ТА В МАТРИЦІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ

Калюжний О.В., Сабол С.Ф., Редька К.В.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** Методом скінченних елементів проведений аналіз витягування в радіальній традиційній матриці та в матриці спеціального профілю вісесиметричних порожнистих виробів із нержавіючої сталі. Встановлено залежності зусилля витягування та зусилля на притискачі від переміщення пуансона. Визначено напружений стан здеформованих заготовок при максимальній величині зусилля витягування, кінцевий деформований стан та форма і розміри виробів. Проведено порівняння отриманих результатів. Використання матриці спеціального профілю приводить до зниження зусилля витягування та зменшення величини осьових розтягувальних напружень у здеформованій заготовці при витягуванні. Вказані переваги дозволяють зменшити величини зазорів між заготовкою і притискачем, між пуансоном та матрицею та підвищити точність форми і розмірів виробів.

**Ключові слова:** витягування, метод скінченних елементів, порожнистий виріб, матриця традиційна, матриця спеціального профілю, зусилля витягування, напруження, деформації.

Витягування вісесиметричних порожнистих виробів із листових заготовок в радіальних матрицях з притискачем є широко розповсюджений процес для отримання балонів та різноманітних ємностей. Одним із способів інтенсифікації витягування полягає в зниженні зусилля деформування, що забезпечує зменшення осьових розтягувальних напружень в стінці здеформованої заготовки при формоутворенні, які є причиною обриву донної частини вказаної заготовки. На зусилля витягування впливає тертя на радіусі заокруглення та калібруючому пояску матриці. Використання деформуючого інструменту спеціального профілю приводить до зниження сил тертя, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу та збільшити ступінь деформації за один перехід [1-2].

Метою роботи є визначення і порівняння параметрів витягування вісесиметричних порожнистих виробів в традиційній радіальній матриці та радіальній матриці спеціального профілю.

Схема витягування в матриці спеціального профілю зображена на рис. 1. Ліворуч від осі симетрії показане положення на початку витягування, праворуч - в процесі витягування. Вихідна листовая заготовка 1 діаметром  $D_0$  і товщиною  $S_0$  розміщена між матрицею 2 та

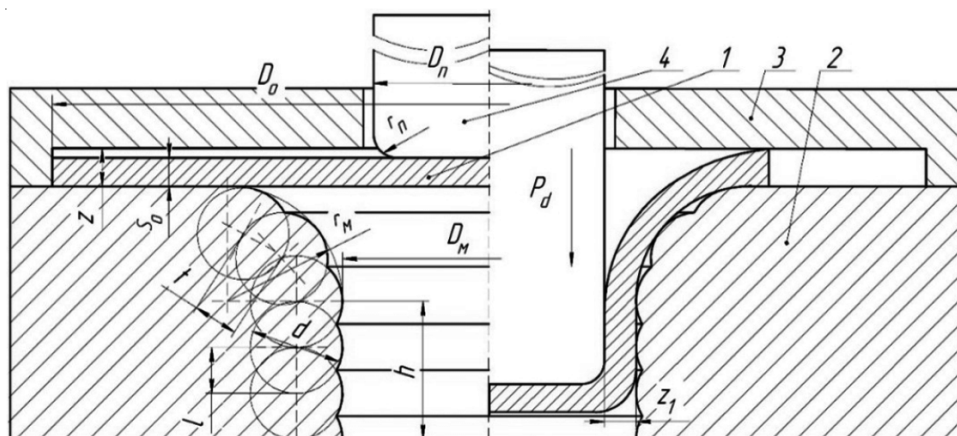


Рис. 1 - Схема радіальної матриці спеціального профілю

притискачем 3. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 4. Деформуюча поверхня матриці утворена перетином торів, що мають переріз діаметром  $d$ , які являються дотичними до радіуса заокруглення матриці  $r_m$  та до циліндричної поверхні матриці діаметром  $D_m$ . Крок розташування торів на радіусі матриці  $r_m$  має величину  $t$ , а на циліндричній поверхні матриці -  $l$ .

Встановлення параметрів проводили шляхом моделювання методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM. Витягуванню із коефіцієнтом тертя  $\mu=0,08$  та швидкістю деформування  $V_0=7$  мм/сек підлягали листові заготовки із сталі AISI 304. Розміри вихідної заготовки:  $D_0=208$  мм,  $S_0=1$  мм. Розміри пуансона та матриці при витягуванні в традиційній радіальній матриці були наступні (див. рис. 1):  $D_p=106,1$  мм,  $r_p=10$  мм,  $D_m=108,5$  мм,  $r_m=10$  мм,  $h=20$  мм. При цьому величини зазорів між матрицею і притискачем та пуансоном і матрицею склали відповідно  $z=1,3$  і  $z_1=1,2$  мм. Деформуюча поверхня матриці спеціального профілю утворена перетином торів діаметром  $d=8$  мм з кроками розташування  $t=1,5$  мм та  $l=2$  мм.

На рис. 2 приведені в розрізі розрахункові положення деформуючого інструменту і заготовки на різних стадіях витягування. Положення на початку витягування зображене на рис. 2а. Вихідна заготовка 1 розміщена між матрицею 2 і притискачем 3. Зусилля деформування прикладали за допомогою пуансона 4. На рис. 2б наведено положення при максимальному значенні зусилля витягування. Положення в кінці витягування з отриманням виробу 5 зображене на рис. 2в.

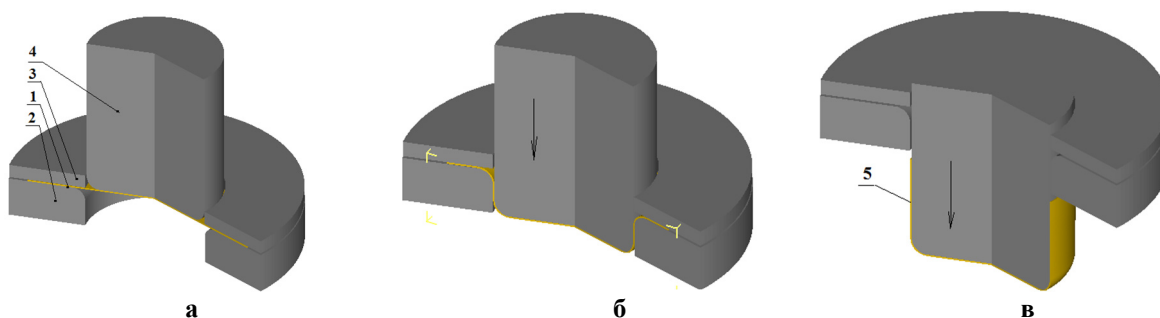


Рис. 2 – Розрахункові положення деформуючого інструмента: а – на початку витягування, б – при максимальній величині зусилля витягування, в - в кінці витягування

На рис. 3 показані залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів. Вигляд залежностей для витягування в різних матрицях практично однаковий. При витягуванні в традиційній радіальній матриці зусилля досягає максимальної величини 190 кН при переміщенні пуансона 32 мм, а при витягуванні у матриці спеціального профілю отримана максимальне значення 164 кН при переміщенні 30 мм. Другий максимум зусилля витягування має місце при витягуванні торця здеформованої заготовки, який має найбільшу величину потовщення, в зазор між пуансоном і циліндричною поверхнею матриці. Використання радіальної матриці спеціального профілю приводить до зменшення максимальної величини зусилля витягування на 14% в порівнянні з традиційною радіальною матрицею. Зменшення зусилля забезпечується завдяки зниженню сил тертя на радіусі заокруглення матриці спеціального профілю.

Залежності зусилля, що сприймають жорсткі притискачі, при витягуванні в різних матрицях зображені на рис. 3. Величини цих зусиль на протязі витягування однакові. Максимальні значення зусилля 30 кН отримані при переміщенні пуансонів 56 мм.

На рис. 4 наведені розподіли осьових напружень  $\sigma_z$  у здеформованих заготовках при

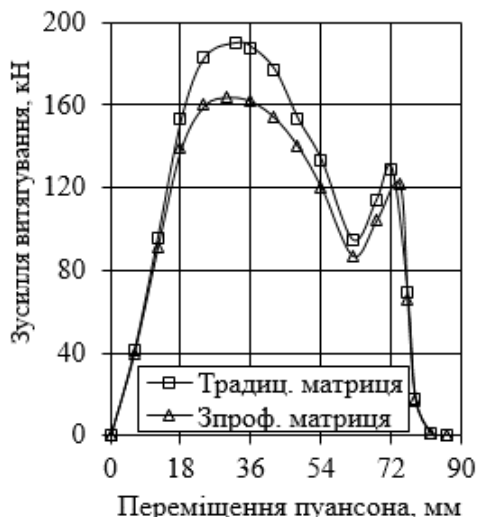


Рис. 3 - Залежності зусилля витягування від переміщення пуансона

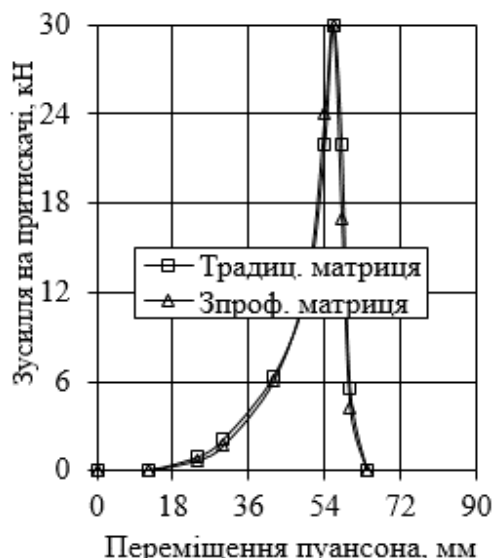


Рис. 4 - Залежності зусилля на притискачі від переміщення пуансона

максимальному значенні зусилля витягування для розглянутих варіантів матриць. Тонкими лініями показаний деформуючий інструмент. Завдяки зниженню зусилля витягування у матриці спеціального профілю зменшуються величини напружень  $\sigma_z$  у здеформованій заготовці при витягуванні в матриці спеціального профілю в порівнянні з традиційною матрицею. Особливо суттєве зменшення має місце в небезпечному перерізі (перехід від радіуса заокруглення на пуансоні до циліндричної частини стінки). При витягуванні в традиційній матриці у вказаному місці отримано  $\sigma_z=530$  МПа, а при витягуванні в матриці спеціального профілю -  $\sigma_z=370$  МПа. Таким чином, використання матриці спеціального профілю дозволяє збільшити діаметр вихідної заготовки та зменшити коефіцієнт витягування за один перехід при даній відносній товщині заготовки.

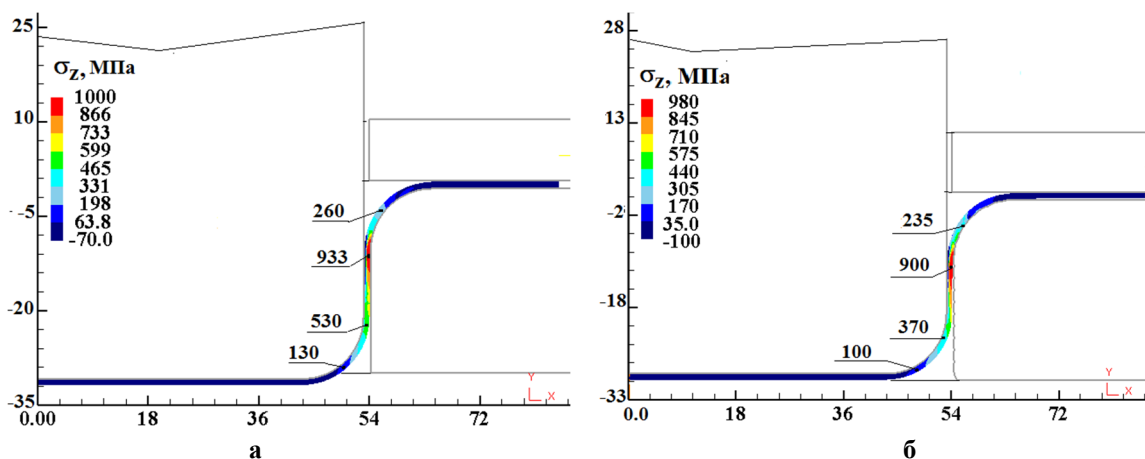


Рис. 5 – Розподіли осьових напружень  $\sigma_z$  у здеформованих заготовках при максимальному значенні зусилля витягування: а – при витягуванні в традиційній матриці, б – при витягуванні в матриці спеціального профілю. Розміри по осях в міліметрах

Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  у стінці виробу та форма і розміри половини виробу зображені на рис. 5. На рис. 5а наведений розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$ . Найбільші величини  $\epsilon_i=0,68\div 0,9$  зосереджені в зоні торця стінки виробу з подальшим зменшенням до  $\epsilon_i=0,16$  в місці переходу циліндричної частини стінки в радіус заокруглення. Розміри половини виробу показані на рис. 6б. Стінка виробу має різну товщину по висоті.

Торець стінки потовщується з вихідної товщини  $S_0=1\text{мм}$  до товщини 1,2 мм. Центральна частина стінки має товщину 1,05 мм. На радіусі заокруглення стінки в донну частину товщина зменшується до значення 0,97 мм.

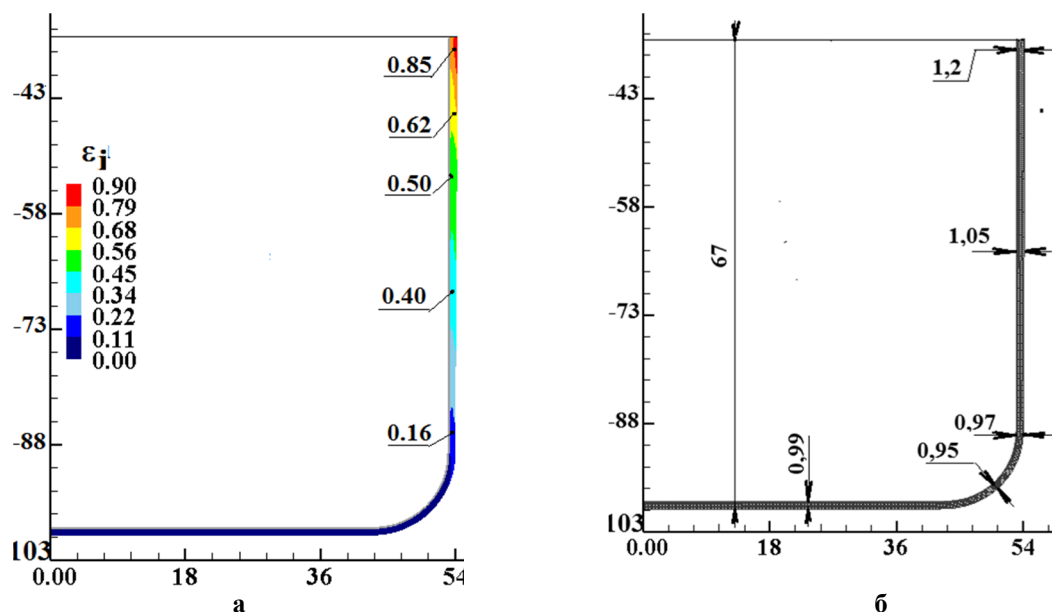


Рис. 6 – Розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  у стінці виробу та форма і розміри половини виробу: а - розподіл  $\varepsilon_i$ , б – форма і розміри виробу

Висновки. 1. Проведено порівняльний аналіз витягування вісесиметричних порожнистих виробів в традиційній радіальній матриці та в радіальній матриці спеціального профілю. 2. Встановлено величини зусиль на пуансоні та притискачі при витягуванні, визначено напружено-деформований стан заготовок та виявлено кінцеву форму і розміри виробу. 3. Використання матриці спеціального профілю приводить до зменшення зусилля витягування та зниження осьових розтягувальних напружень в небезпечному перерізі zdeформованої заготовки в порівнянні з традиційною матрицею, що дозволяє зменшити коефіцієнт витягування за один перехід.

#### Список літератури:

1. Калюжний О.В. *Інтенсифікація комбінованого витягування вісесиметричних порожнистих виробів в одноконусній матриці спеціального профілю* // *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – ДГМА. – Краматорск, 2017 р. – №1 (44). – С. 229-238.*
2. Калюжний О.В. *Визначення параметрів витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок після видавлювання* / В.О. Калюжний, С.С. Соколовська // *Вісник НТУ «ХП», Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії», Харків, НТУ «ХП», 2017. № 36(1257). - С. 21-28.*

УДК 623.451:519.6

## ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Бейгельзимер Я.Е.**

Донецкий Физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, г. Киев, Украина

***Аннотация.** В работе представлен краткий обзор исследований по интенсивной пластической деформации и проанализированы перспективы практического применения субмикроструктурных материалов. Показано, что наибольший эффект может быть получен при их использовании для изготовления прецизионных изделий малых размеров: электрических мини- и микромоторов для роботов и дронов, мини- и микродвигателей внутреннего сгорания, мини газотурбинных двигателей, миниредукторов, упругих элементов электромеханических систем, медицинских имплантатов и т.д.*

***Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, новые материалы, субмикроструктурные материалы, изотермические преобразования, теорема о почти-изометрических преобразованиях.*

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) (Severe Plastic Deformation (SPD)) - устоявшийся термин, обозначающий группу процессов обработки материалов давлением, которые позволяют осуществлять большую пластическую деформацию металлов, сплавов и полимеров практически без изменения размеров образца [1]. Величина эквивалентной деформации при ИПД на порядок и более превышает значения, характерные для таких традиционных процессов обработки давлением, как прокатка, волочение, штамповка и т.д. Значительное увеличение деформации достигается, в основном, благодаря двум факторам: (i) немонотонному (чаще всего циклическому) нагружению материала) и (ii) высокому гидростатическому давлению в очаге деформации. За двадцать лет развития ИПД в исследовательских лабораториях получены субмикроструктурные (СМК) наноструктурные материалы с замечательными физико-механическими характеристиками. В последние несколько лет начались работы по их промышленному применению в медицине, электронике и аэрокосмической технике [2].

В докладе представлен краткий обзор исследований по ИПД и проанализированы перспективы практического применения СМК материалов. Показано, что наибольший эффект может быть получен при их использовании для изготовления элементов различных механизмов и устройств малых размеров (от ~10 мкм до ~10 мм), к которым предъявляются высокие требования по прочности и точности. Например: элементы электрических мини- и микромоторов для роботов и дронов; элементы мини- и микродвигателей внутреннего сгорания для авиамodelей; элементы мини газотурбинных двигателей для электрогенераторов индивидуального пользования; элементы миниредукторов; упругие элементы электромеханических систем; медицинские имплантаты и т.д.

Основное внимание в докладе сосредоточено на новом применении ИПД – создании сплавов и гибридных материалов [3]. Развитие процессов в этом направлении базируется на механохимическом синтезе и трех эффектах ИПД: (i) аномально быстром массопереносе в объеме деформируемого твердого тела, (ii) захвате веществ его поверхностью и (iii) значительном контролируемом изменении взаимного расположения материальных точек внутри деформируемого тела, происходящем несмотря на то, что после каждого цикла обработки размеры образца возвращаются к исходным.

Благодаря указанным эффектам возможна доставка нужных веществ в заданные точки деформируемого образца и синтезирование в них соответствующих соединений. В результате, в объеме образца могут быть образованы области из разных сплавов. Управление этим процессом позволит создавать внутри твердого тела конструкции со сложной



архитектурой из разных сплавов, иными словами, получают гибридные материалы с совершенно новыми свойствами.

Введение различных веществ в образец возможно как путем предварительного их внедрения в его объем до ИПД, так и в процессе деформации, через его поверхность. Если ИПД осуществлять в специальной жидкой или газовой среде, либо наностить на заготовки перед деформации порытия из поверхностно активных сред, то атомы этих сред будут проникать в поверхностные слои образца, а затем разноситься по его объему. Попадание веществ через поверхность образца существенно облегчается, когда в ходе деформации ее площадь циклически изменяется, как, например, в процессе винтовой экструзии (ВЭ) [4].

В докладе показано, что развитие ИПД в указанном направлении раскрывает новые горизонты в прикладном материаловедении и инициирует постановку захватывающих научных задач. Приведем лишь некоторые, наиболее интересные, на наш взгляд.

Ряд проблем связан с описанием процессов ИПД в рамках механики континуума. Например, если в сплошной среде выделить некоторую замкнутую односвязную область  $\Omega$ , то при деформации она таковой и должна оставаться. Область может сколь угодно деформироваться (например, вытягиваться), но принадлежащие ей в начале деформации материальные точки не могут выйти за ее пределы. Очевидно, что в рамках такого подхода нельзя описать, например, распыление включения, когда оно распадается на не связанные друг с другом части.

С предыдущей, неразрывно связана проблема описания массопереноса в пластически деформируемом теле. Сейчас, в основном, полагают, что он обусловлен диффузией. Но как тогда можно объяснить перенос не атомов, а отдельных фрагментов вещества? В работе [5] предложен механизм переноса, основанный на случайном вихревом поле скоростей, в определенном смысле аналогичном турбулентному движению жидкостей. Такой механизм объясняет быстрый массоперенос, но требует экспериментального обоснования.

С возможными разрывами смещений в пластически деформируемом теле связана следующая проблема. На микроскопическом уровне металлы имеют кристаллическую решетку, которая может испытывать лишь упругие деформации, по порядку величины не превышающие  $10^{-3}$ . Отсюда следует, что на микроуровне, пластическую деформацию можно считать изометрическим отображением, не изменяющим длин отрезков. К таким преобразованиям относят перемещение, поворот и симметрическое отражение. Согласно теореме о почти-изометрических преобразованиях [6], непрерывное отображение, изометрическое в малой окрестности каждой точки, является изометрическим во всей области. Поэтому, для того, чтобы привести к изменению длин на макроскопических масштабах, пластическая деформация должна принадлежать к классу изометрических преобразований с особенностями (piecewise isometric transformation) [7]. В работе [5] показано, что на основе этой идеи можно наметить путь описания массопереноса в пластически деформируемом поликристалле.

#### Список использованной литературы:

1. Estrin Y. *Acta Mater* / Y.Estrin, A.Vinogradov.-2013. 61.-P.782
2. Valiev R.Z. *JOM* / R.Z.Valiev, Y.Estrin, Z.Horita, T.G.Langdon, M.J.Zehetbauer, Y.T.Zhu.- 2016.- 68.-P.1216
3. Beygelzimer Y. *Adv. Eng. Mater* / Y.Beygelzimer, Y.Estrin, R.Kulagin. -2015.-17.- 12.-P.1853
4. Beygelzimer Y. / Y.Beygelzimer, R.Kulagin, Y.Estrin at el. // *Advanced Engineering Materials*. –2017. –Vol. 19, Issue 8. – P. 321
5. Beygelzimer Y. *arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci]*/ Y. Beygelzimer, N.Lavrinenkoю- 2012.
6. Люстерник Л.А. *Элементы функционального анали за* // Люстерник Л. А., Соболев В. И.// М.:Наука, 1965. -350 с.
7. Jonathan H.B.D. *Meccanica* / H.B.D. Jonathan.- 2006.- 41.- 3.- P.241.

УДК 621.73

## К ВОПРОСУ РАСШИРЕНИЯ СОРТАМЕНТА ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОГО КРУГЛОГО ПРОКАТА

Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Горожанкин А.С., Пивоваров Р.Е.

Старооскольский технологический институт им. А.А.Угарова (филиал НИТУ "МИСиС")

*Аннотация.* В наше время в прокатном производстве возрастает потребность в прокатных блоках с трехвалковыми клетями. Среди их преимуществ можно указать возможность реализации процесса низкотемпературной прокатки. В данной работе выдвинута гипотеза о возможном влиянии макроструктурного состояния раската на формируемую результирующую точность готового профиля.

*Ключевые слова:* прокатные блоки, РКБ, стали.

В последние 20-25 лет востребованность прокатных блоков с трехвалковыми клетями имеет тенденцию к росту. Это обусловлено тем, что наряду с традиционными их преимуществами (увеличение скорости прокатки, повышение точности профиля, сокращение поля допусков до  $\pm 0,1$  мм, улучшение технико-экономических показателей работы станов) появилась возможность реализовывать процесс низкотемпературной прокатки.

В России непрерывные сортовые станы стали оснащаться блоками калибрующих клетей - РКБ (прецизионный калибровочный стан) после 2000 года. В частности, на ОАО "Оскольский электрометаллургический комбинат" – ОАО ОЭМК в 2002 был введен РКБ в мелкосортной линии стана 350 фирмы KOCKS (производство кругов  $\varnothing 12-40$ мм), а в 2017 году – в среднесортной линии стана 350 типа PSM® 380/4 (производство кругов  $\varnothing 25-83$ мм). В 2016 году на стане 350 филиала ООО "УГМК-Сталь" в Тюмени - МЗ "Электросталь Тюмени" смонтирован РКБ фирмы Danieli (производство кругов  $\varnothing 10-42$ мм и эквивалентных профилей шестигранного сечения с высокой точностью геометрических размеров).

Использование РКБ для реализации процесса низкотемпературной прокатки (таблица 1) создало предпосылки для дальнейшего усовершенствования данной системы. Дело в том, что использование на современных непрерывных сортовых станах исключительно непрерывнолитой заготовки, потребовало определения (в условиях каждого из станов) максимального сечения проката, в котором удастся достичь полной проработки металла. Не выполнение данного условия приводит к тому, что в сечении раската выявляются следы литой структуры (рис. 1).

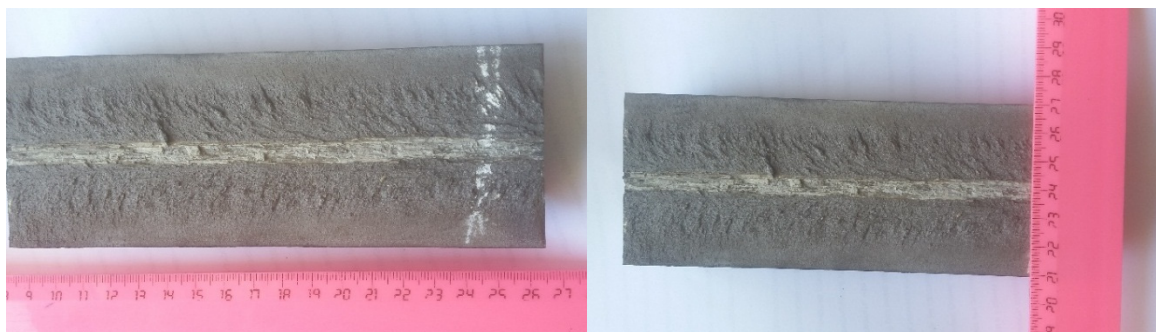


Рис. 1 - Продольный темплет круга  $\varnothing 65$  мм из стали 45: исходное сечение заготовки 170X170 мм

В этом случае, использование РКБ с диаметром валков на уровне 370 мм не обеспечивает, по всей видимости, проникновения деформации во внутренний слой подката, и как следствие - получение в готовом профиле неравномерной проработки металла по сечению профиля.

Все вышеизложенное, в дальнейшем, находит свое отражение в гипотезе о возможном влиянии макроструктурного состояния раската на формируемую результирующую точность

готового профіля. Смысл данной гипотезы сводится к тому, что наличие разных структурных составляющих, обладающих различными коэффициентами линейного расширения, будет приводить к возрастанию величины колебаний диаметра круга в одном сечении, а также в сечениях по длине прутка.

Таблица 1

**Чистовая прокатка круглого проката с использованием РКБ в потоке ЛПК-5  
компании BAOSTEEL SHANGHAI**

Группа стали	Т-ра на входе клетки №7, °С	Т-ра на входе РКБ, °С	Т-ра на входе холодильника, °С	Система DSC	Замедленное охлаждение
Аустенитная нержавеющая сталь	1030-1070	970-1030	-	Не исполъ.	Не исполъ.
Аустенитная клапанная нержавеющая сталь	1100-1120	980-1030	-	Не исполъ.	Не исполъ.
Мартенситная нержавеющая сталь	1020-1100	950-1000	-	Исполъ.	Исполъ.
Ферритная нержавеющая сталь	950-970	880-920	870-890	Не исполъ.	Исполъ.
Подшипниковая сталь	970-990	780-840	720-760	Исполъ.	Не исполъ.
Пружинная сталь	950-970	780-840	780-820	Исполъ.	Не исполъ.
Сталь для холодной высадки	950-970	840-860	820-840	Исполъ.	Не исполъ.
Низколегированная сталь	950-970	820-860	800-840	Исполъ.	Не исполъ.
Углеродистая конструкционная сталь	950-970	860-900	840-860	Исполъ.	Не исполъ.
Автоматная сталь	950-970	880-920	860-880	Исполъ.	Не исполъ.

Косвенным подтверждением правомерности подобной гипотезы может служить тот факт, что ряд предприятий Германии, для прокатки из качественной стали круглого проката сечением Ø 33-55 мм (исходное сечение заготовки 120x120 мм÷150x150 мм) использовали трехвалковые клетки с диаметром валков 500мм. Это оправдано, с точки зрения основных положений теории прокатки: чем больше диаметр валков, тем больше глубина проникновения деформации и выше качество проработки структуры металла.

**Список литературы:**

1. Бочков Н.Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах / Н.Г.Бочков. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
2. Амерлинг А.Ю. Существенное улучшение качества продукции и производительности станов для прокатки проволоки и сорта с гибкой системой блоков фирмы КОКС / А.Ю. Амерлинг // сб. науч. Тр. Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. 6-10 июня, 1994 г. – М.: Металлургия. – т.3. – С. 249 – 255.
3. Гладков Г.А. Прокатка особо точных профилей / Г.А. Гладков, Ф.Е. Долженков, Л.Н. Прищенко – М.: Металлургия, 1979.- 215с.
4. Минкин А.В. Расчет системы вытяжных калибров / А.В. Минкин – М.: Металлургия, 1989.- 208 с.
5. Долженков Ф.Е. Холодная прокатка круглой и шестигранной стали малых размеров // Сб. науч. тр. Обработка металлов давлением. – Краматорск.: ДГМА, 2002. – С. 149 – 154.
6. Долженков Ф.Е. Калибровка валков в системах круг трехгранник и круг- стрельчатый трехгранник для холодной прокатки тонкой проволоки в блоках трехвалковых клеток // Металл и литье Украины, 2000. – С. 53-57.
7. Смирнов А.Н. Вопросы использования непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката из конструкционных сталей / Смирнов А.Н., Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Белевитин В.А., Пивоваров Р.Е. // Сталь. 2018. №4. С.7-12.

УДК 612.431.75

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ У ПРОЦЕСІ ВИГЛАДЖУВАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ CAD/CAE ANSYS

Герасимова<sup>1</sup> О.В., Мозговий<sup>2</sup> О.В., Тітов<sup>3</sup> А.В.

1 – Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна,

2 – Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця, Україна,

3 – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна.

***Анотація.** Виконане чисельне моделювання пружно-пластичного процесу вигладжування за наявності покриття з використанням системи CAD/CAE ANSYS. З використанням розробленої моделі проаналізовано напружено-деформований стан поверхневого шару і встановлені залежності напружено-деформованого стану в залежності від коефіцієнту тертя та параметрів технологічного процесу вигладжування. Показано, що результати дозволяють керувати процесом вигладжування за наявності покриттів на поверхні деталей.*

***Ключові слова:** вигладжування, напружено-деформований стан, чисельне моделювання, метод скінченних елементів.*

Забезпечення експлуатаційних характеристик (надійності та ресурсу) виробів є найважливішою проблемою сучасного машинобудування. Працездатність виробів, таких як літальні апарати, двигуни, автомобілі та інші, у значній мірі залежить від якості поверхні деталей [1, 2]. Відомо, що зародження втомної тріщини починається з поверхні деталі в приповерхневому шарі. Тому на фінішних операціях виготовлення відповідальних деталей виробів здійснюють їх обробку методами поверхневого пластичного деформування (ППД). Однією з найбільш ефективних фінішних обробок деталей методами поверхневого пластичного деформування є вигладжування. Ця обробка дозволяє поліпшити параметри якості поверхневого шару деталей, що забезпечує підвищення надійності і ресурсу виробів у цілому.

При вигладжуванні, сталей та сплавів алюмінію взаємодія інструмент-деталь характеризується невеликим коефіцієнтом тертя і процес протікає стійко, а ефективність вигладжування визначається, як правило, зусиллям обробки та формою інструменту. Але при вигладжуванні виробів з титанових сплавів сили адгезійної взаємодії досить великі, тому процес супроводжується руйнуванням поверхневого шару та підвищеним зносом інструменту (алмаз, твердий сплав та інші). Одним із шляхів вирішення проблеми обробки титанових сплавів вигладжуванням є нанесення на поверхню титану додаткового покриття, яке зменшить адгезійні зв'язки між деталлю та інструментом і забезпечить стійке протікання процесу вигладжування. Але при цьому необхідно враховувати особливості напружено-деформованого стану (НДС) за наявності покриття на поверхні, оскільки при формуванні поверхневого шару при вигладжуванні крім основних деформацій, які визначають основні параметри якості поверхневого шару, виникають додаткові деформації зсуву значної величини, які можуть викликати розшарування покриття за його наявності. Тому аналіз НДС в процесах вигладжування особливо актуальний за наявності покриття на оброблюваній поверхні.

Чисельне моделювання процесу вигладжування за наявності покриття на поверхні деталі виконане методом скінченних елементів з використанням CAD/CAE ANSYS [3]. При моделюванні була використана апробована у роботі [4] чисельна модель процесу вигладжування без наявності покриття. В результаті аналізу НДС поверхневого шару деталі визначені параметри зміцненого поверхневого шару деталі та проаналізовано його

напружено-деформований стан. Розрахунки виконані для покриттів, що мають різний рівень механічних властивостей. Виявлено виникнення деформацій зсуву в поверхневому шарі внаслідок руху інструменту. Показано, що величина деформацій зсуву залежить від механічних властивостей матеріалу проміжного шару. Встановлені залежності напружено-деформованого стану в залежності від коефіцієнту тертя та параметрів технологічного процесу вигладжування. В результаті показано, що в подальших дослідженнях доцільно використання теорії деформівності для визначення умов суцільності поверхневого шару. Отримані результати дозволяють керувати процесом вигладжування за наявності покриттів на поверхні деталей.

### Висновки:

1. Розроблена та обґрунтована чисельна модель процесу вигладжування за наявності покриття на поверхні деталі з використанням системи CAD/CAE ANSYS, яка дозволяє визначати всі компоненти тензора діючих і залишкових напружень.
2. Використання розробленої моделі дозволяє прогнозувати властивості поверхневого шару для покриттів з різними механічними властивостями і вибирати оптимізовані технологічні параметри процесу вигладжування.

### Література:

1. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. - 333 с.
2. Богуслаев В. А. Формирование параметров качества несущих поверхностей валов ГТД алмазным выглаживанием [Текст] / В А. Богуслаев, В. Ф. Мозговой, А. Я. Качан, В. А. Титов, А. И. Попенко // Вестник двигателестроения, 2003. – №1. – С. 84 – 89.
3. ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP©.
4. Титов А.В. Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов // А.В. Титов, Л.В. Шмелёва, Е.А. Кириенко, О.В. Герасимова / Обработка материалов давлением, 2015, № 2 (41) – С. 81-86.