

УДК 621.774

О.В. Нахайчук

Вінницький державний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В роботі представлені комплексні методики дослідження нових технологічних процесів, які характеризуються формоутворенням заготовок в умовах складного навантаження та немонотонного деформування. Показано, що на основі розвитку математичної теорії пластичності та феноменологічної теорії деформуємості є можливим прогнозувати технологічну спадковість заготовок без проведення трудомістких експериментальних досліджень.

О. В. Нахайчук. Исследование процессов формообразования заготовок при сложном нагружении. В работе представлены комплексные методики исследования новых технологических процессов, которые характеризуются формообразованием заготовок в условиях сложного нагружения и немонотонного деформирования. Показано, что на основании развития математической теории пластичности и феноменологической теории деформируемости представляется возможным прогнозировать технологическую наследственность заготовок без проведения трудоёмких экспериментальных исследований.

O. Nahaichuk. Investigation of blanks forming processes by difficult loading. In the work complex methods of investigation of new technological processes of blanks formation in difficult loading and non-monotonous deformation conditions are presented. It is shown that on the basis of development of mathematical theory of plasticity and phenomenological theory of deformability makes possible predicting technological heredity of blanks without conducting labour-consuming experimental researches.

Сучасні технології характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується течія матеріалів із складною

реологією в умовах складного навантаження. Тому їх розробка, вивчення та вдосконалення неможливі без застосування як традиційних теорій пластичності і обробки металів тиском, розрахунково-експериментальних методів, так і створення нових підходів для вирішення різних прикладних задач.

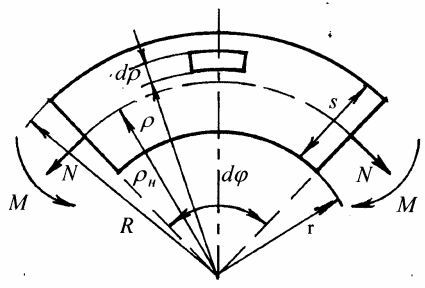
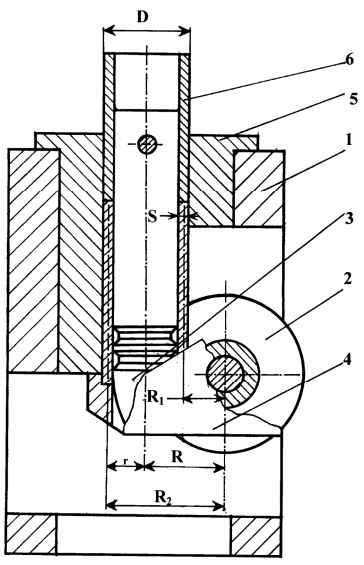
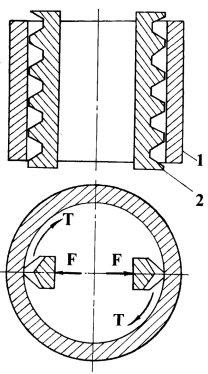
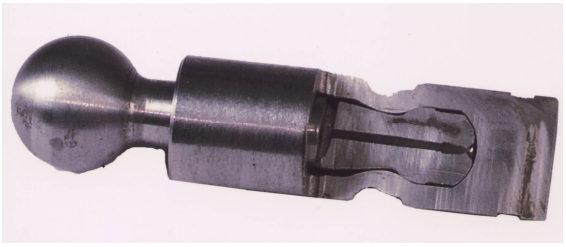
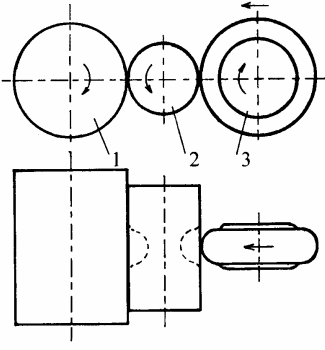
Поява принципово нових технологічних процесів, в основу яких покладені методи холодного пластичного деформування, супроводжуються руйнуванням металу в процесі його обробки, втратою стійкості заготовок, зростанням зерен металу після термообробки, критичною пористістю, що виникає в процесі формоутворення порошкових матеріалів та ін.

Перераховані проблеми, зокрема, можуть бути розв'язані за допомогою феноменологічної теорії деформуємості, що є по суті новим розділом прикладної теорії пластичності.

Застосування теорії деформуємості для вирішення технологічних задач дозволяє дати відповідь не тільки на питання визначення умов граничного формоутворення. Оцінка пластичності матеріалу заготовки важлива також в тих випадках, коли після даної операції слідує термообробка, оскільки властивості матеріалу після термообробки залежать від ступеня використання запасу пластичності, одержаного на попередніх операціях - як відомо, існують критичні значення, перевищення яких приводить до різкого погіршення механічних властивостей матеріалу.

Наступна задача полягає в оцінці залишкової пластичності в різних геометричних площинах одержаної деталі. Це необхідно для з'ясування можливості реалізації подальшої операції, пов'язаної з пластичним деформуванням, а також отриманням виробів з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Для оцінки деформуємості заготовок і забезпечення сприятливої технологічної спадковості необхідно вивчити історію деформування матеріальних частинок заготовок в небезпечній області, тобто визначити тензорні поля напружень σ_{ij} , деформацій ε_{ij} як функції координат і часу. При рішенні цих задач для технологічних процесів, що супроводжуються складним навантаженням і немонотонним деформуванням, виникають проблеми надійного



розрахунку компонент девіатора напружень (S_{ij}). В цих умовах відомі фізичні рівняння не можуть в достатній мірі описати зв'язок S_{ij} і ε_{ij} .

Нами пропонується застосовувати моделі Г. Бакхауза, що враховують ефект Баушингера. Крім того, є можливість врахувати постулат ізотропії О. А. Ільюшина і ввести поправки, які зменшують ступінь розбіжності векторів напружень і швидкостей деформацій.

Враховуючи вищевикладене, **метою даної роботи** є розробка загальних підходів до дослідження процесів, які характеризуються формоутворенням заготовок в умовах складного навантаження, немоного деформування і, в деяких випадках, близькістю до руйнування матеріалу в найбільш небезпечних областях.

Досліджувані нами процеси [1-6] (рис. 1) відносяться до обробки металів тиском в холодному стані, що характеризуються формоутворенням заготовок при складному навантаженні, в яких монотонне деформування змінюється немоногом і навпаки, деяким технологічним операціям притаманна термообробка. Тому для запобігання руйнування виробів і втрати їх стійкості, виникла необхідність розробки нових підходів для рішення прикладних технологічних задач, які містять поєднання відомих теорій, включаючи феноменологічну теорію деформуємості, і розрахунково-експериментальні методи.

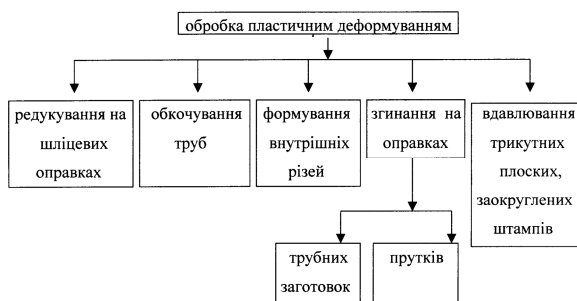


Рис. 1. Досліджувані процеси

Аналіз механіки формоутворення даних виробів показує, що при створенні сучасних "високих" технологій існує наукова про-

блема недостатності знань та методів в галузі розрахунків та проектування технологічних процесів обробки металів тиском, а також визначення граничних можливостей формоутворення заготовок в умовах об'ємного напруженого стану, близьких до вичерпання ресурсу пластичності. Це, в свою чергу, викликає необхідність створення основ теорії деформуємості заготовок складного профілю в умовах граничного формоутворення, яка, зокрема, може надати можливість проведення оцінок вірогідності руйнування в найбільш небезпечних областях деформування та отримання виробів із заданими характеристиками пластичності [7].

Оскільки дослідження даних процесів потребує врахування багатьох факторів (див. табл. 1), то однією із основних задач є прийняття одного, найбільш впливового на якість показника. Таким, на наш погляд, може бути використаний ресурс пластичності ψ , який на кожний технологічний процес покладає відповідні обмеження (рис. 2.), наприклад, стосовно процесу отримання внутрішнього шліцьового профілю – степінь обтиску за один прохід; при реалізації процесу обкочування пари поршень-шатун – поздовжня подача ролика та ін.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика процесів

Процес	Традиційне виконання	Нові технології	Переваги	
Нанесення внутрішнього шліцьового профілю на трубній заготовці	Деформуючоріжучим протягуванням	Обтиск на жорсткій оправці	Можливість керування фізико-механічними характеристиками, підвищення продуктивності	Економія металу, підвищення характеристик міцності, зменшення шорсткості, зниження енерговитрат
Формоутворення внутрішньої метричної різьби	Різанням, накочуванням	Видавлювання різьбоутворюючими пластинами		Підвищення статичної та втомлювальної міцності, стабільність розмірів
Згинання труб та прутків на оправках	В гарячому стані	В холодному стані на жорстких оправках		Відсутність складного обладнання, значне зниження енерговитрат, екологічна чистота
Обкочування пари поршень-шатун	Обкочування роликками труб	Отримання потрібного складного профілю		Підвищення характеристик міцності

Виходячи з викладеного, практичне значення має виконання експериментально-теоретичних досліджень по встановленню залежностей впливу основних технологічних факторів кожного процесу на величину ψ . Це дає можливість вибирати оптимальну схему деформування, та за рахунок раціональної побудови техно-

логічних операцій, прогнозувати отримання виробів з необхідними характеристиками.

Така постановка задачі викликає необхідність не тільки розробки фізико-математичних моделей для розрахунків напружено-деформованого стану, силових характеристик, досліджень стійкості заготовок, а і застосування існуючих критеріїв руйнування та створення нових, які б в повній мірі враховували вплив



Рис. 2. Наукові підходи до вирішення поставлених задач

визначальних, на наш погляд, факторів: інваріантів тензора напружень на ресурс пластичності в небезпечних областях деформування, немонотонність навантаження та нелінійність накопичення пошкоджень. Для дослідних процесів практичний інтерес становлять оцінки параметрів анізотропії пластичності, залишкової пластичності при формуванні заготовок, при цьому необхідно використовувати тензорні моделі про накопичення пошкоджень в деформованому металі. Можливим є також проведення оцінок впливу термообробки на відновлення запасу пластичності в найбільш небезпечних, з погляду руйнування, областях [8].

Таким чином, розробка та застосування критеріїв руйнування надає можливості всебічного вивчення умов деформування заготовок та закономірностей накопичення пошкоджень, які приводять до руйнування в найбільш небезпечних областях, їх залежностей від схеми напруженого стану та історії навантаження. Отже, проведення досліджень в цьому напрямку має практичне значення для оптимізації та вдосконалення дослідних процесів.

Викладені наукові положення дозволили розробити науково обґрунтовані комплексні підходи до вирішення технологічних задач із застосуванням феноменологічної теорії деформуємості та розрахунково-експериментальних методів: сумісного рішення рівнянь рівноваги і умов пластичності, ліній ковзання, подільних сіток, визначення напружено-деформованого стану по розподілу твердості, кінцевих елементів [9, 10].

Рекомендується наступний алгоритм для вивчення процесів холодного об'ємного штампування заготовок, деформуємих в умовах складного навантаження та немонотонного деформування:

1. Проведення поетапних експериментальних досліджень із виконанням розрізів заготовок в різних напрямках; при цьому застосування методу визначення

напружено-деформованого стану по розподілу твердості дає можливість вивчення полів інтенсивності напружень і деформацій (дана інформація може бути використана для розрахунків напружено-деформованого стану на різних стадіях формоутворення заготовок); методу подільних сіток - для поетапного вивчення накопиченої інтенсивності деформації і отримання інформації про реальну кінематику течії металу.

2. Розробка методик розрахунків напружено-деформованого стану на різних стадіях формоутворення заготовок дослідних процесів з врахуванням зміцнення матеріалів в процесі пластичного деформування.

3. Знаходження характеристик технологічного паспорта матеріалу (параметрів кривих течій, діаграм пластичності, кривих Баушинґера). Під технологічними функціями властивостей матеріалів приймаються експериментально одержані діаграми пластичності і криві течії, які враховують пластичність при різних показниках напруженого стану і зміцнення матеріалів. Апроксимації даних функцій можуть бути використані в розрахунках. Характеристиками

технологічного паспорта матеріалів ϵ : для кривих течій – коефіцієнти A і n , де A – напруження текучості при деформації, рівній “1”, n – критична деформація при максимальному навантаженні на кривій розтягу. Зв'язок між значеннями інтенсивності напружень – інтенсивності деформацій може бути виражений залежністю $\sigma_u = Ae_u^n$. Для діаграми пластичності – значення граничних деформацій при стисненні $e_{p(\eta=-1)}$, крученні $e_{p(\eta=-0)}$, розтягу зразків $e_{p(\eta=1)}$, методика визначення яких приведена в роботі [11].

Одним з проявів деформаційної анізотропії металів при їх пластичному деформуванні є ефект Баушингера. Експериментальні дані [12] свідчать про залежність параметра, що характеризує ефект Баушингера, від виду напруженого стану, який реалізується при реверсивній пластичній деформації. Методики оцінки даного ефекту для різних видів напруженого стану а також умов немонотонного пластичного деформування приведені в роботах [13, 14].

4. Визначення небезпечних областей деформування заготовок з використанням різних показників напруженого стану (небезпечною областю вважається та, в якій показники напруженого стану набувають максимальних значень з урахуванням знаку). У технологічній практиці широке застосування знайшли феноменологічні теорії, в основі яких лежить гіпотеза про залежність пластичності від історії навантаження. Характеристиками напруженого стану можуть бути показники, що дозволяють досліджувати траєкторії навантаження не в просторі тензора напружень, а в просторі його інваріантів. Має практичний інтерес оцінка можливості застосування діаграм пластичності, побудованих в умовах плоского або лінійного напружених станів для оцінки деформуємості металів, деформованих в умовах об'ємного напруженого стану. Рішення такої задачі пов'язане з труднощами, які виникають при проведенні спеціальних експериментальних досліджень в камерах високого тиску. В наших дослідженнях показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану можна характеризувати двома показниками напруженого стану, а також обґрунтовано, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень [11, 14, 15]. Вказані підходи припускають поетапне визначення в небезпечній області

деформування значень накопиченого ступеня деформації і показників напруженого стану.

5. Побудова шляху деформування небезпечної області в координатах: ступінь деформації ϵ_u – показник напруженого стану η з подальшою її апроксимацією.

6. Визначення на стадіях формоутворення заготовок використаного ресурсу пластичності по критеріях руйнування із застосуванням отриманих раніше характеристик технологічного паспорта матеріалу і траєкторії шляху деформування небезпечної області. В роботах [9-16] обґрунтовується застосування критеріїв, в основу яких покладений тензорний апарат накопичення пошкоджень, при цьому враховується їх спрямованість і історія деформування небезпечних областей.

7. Встановлення аналітичних залежностей між значеннями використаних ресурсів пластичності і основними параметрами технологічних процесів, формою інструменту.

8. Вивчення можливості максимального збереження пластичності в небезпечній області. Рекомендується застосування двох підходів:

а) вибір матеріалів з високими значеннями граничних деформацій – при цьому слід враховувати, що нові матеріали можуть мати великі показники зміцнюваності в процесі холодного деформування в порівнянні з традиційними. Це може привести до зростання зусиль і навантажень на інструмент; таким чином, для кожного конкретного випадку необхідно проведення економічних розрахунків;

б) використання встановлених аналітичних залежностей Ψ від основних параметрів технологічного процесу і форми інструменту для зміни напрямку шляху деформування у від'ємну область показників напруженого стану (в координатах $\epsilon_u - \eta$).

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано, що створення та удосконалення нових технологічних процесів потребує розробок розрахункових методик, за допомогою яких є можливим ще на стадії проектування технологічних процесів визначати ресурс пластичності різних матеріалів, а

також прогнозувати технологічну спадковість заготовок без проведення трудомістких експериментальних досліджень.

Представлені напрямки до вирішення технологічних задач, що включають застосування феноменологічної теорії деформуємості в поєднанні з розрахунково-експериментальними методами і характеристиками технологічного паспорта матеріалу.

Показано, що отримані залежності граничних характеристик формоутворення заготовок від основних технологічних факторів дають можливість удосконалювати досліджені процеси та визначити рекомендації для їх раціональної побудови.

При дослідженні технологічних процесів, коли формоутворення заготовок відбувається в умовах об'ємного напруженого стану і складного навантаження, необхідно враховувати вплив інваріантів тензора напружень на ресурс пластичності, нелінійність накопичення пошкоджень і немонотонність навантаження. У зв'язку з цим застосування і розробка критеріїв руйнування є перспективним для теорії і практики обробки металів тиском.

1. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Музычук В. И. Приложение теории деформируемости к решению задач механики деформирования внутреннего шлицевого профиля обжатием на оправке. Сборник научных трудов международной НТК “Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно-штамповочного производства”, МГТУ “МАМИ”, Москва, 2003. С 66-75.
2. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Музычук В. И. Исследование процесса закатки поршня с шатуном аксиально-роторного поршневого насоса // Проблемы трибологии. – 2005. - №1(34). – С. 129-133.
3. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Любін М. В., Бабак М. В. Використаний ресурс пластичності металу при видавлюванні внутрішньої метричної різі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. - №1 (18). – С. 68-72.
4. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Грушко О. В. Комплексное исследование механики формообразования крутоизогнутых отводов // Проблемы трибологии. – 2000. - №4. – С. 77-84.
5. Нахайчук О. В. Оценка деформируемости металла при изготовлении зубьев граблей // Вісник Харківськ. держ. техн. універс. с/г.– 2001.–Том 2, вип 8. – С. 279-284.

6. Нахайчук О. В. Напряжённо-деформированное состояние при вдавливании в пластичный материал инденторов различных форм // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск: ДГМА. – 2000. – С. 41-47.
7. Нахайчук О. В. Розвиток процесів холодного об'ємного штампування заготовок складного профілю на основі оцінки їх якості в умовах граничного формоутворення: Автореф. дис. ...д-ра. техн. наук: 05.03.05 / ДДМА, Краматорськ, 2006. – 35 с.
8. Огородніков В. А., Нахайчук О. В., Музичук В. І. Вплив термообробки на відновлення запасу пластичності виробу під час формування внутрішнього шлицевого профілю // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. - №5. С. 92-95.
9. Нахайчук О. В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДГМА. – 2005. – С. 119-123.
10. Огородников В. А., Нахайчук О. В. Подходы к изучению механики процессов формообразования заготовок // Тези доп. мінар. НТК “Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки металів тиском і автотехнічних експертизах” – Вінниця: ВНТУ, 2006. – С. 38-42.
11. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
12. Хван Д.В., Бочаров В.Б. Исследование эффекта Баушингера при линейном напряжённом состоянии // Проблемы прочности. – 1989. №7. – С. 112-114.
13. Огородников В.А., Бабак Н.В. Механика немонотонного пластического деформирования // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – С. 255-259.
14. Огородников В. А. Деформируемость металла при обработке давлением // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1976. – № 3. – С. 74–78.
15. Огородников В.А., Нахайчук О.В. О влиянии третьего инварианта тензора напряжений на деформируемость в процессах объёмного формообразования // Прогрессивные методы и технологиче-

ское оснащение процессов обработки металлов давлением: Сб. тез. междун. НТК. – БГТУ “Военмех”, Санкт-Петербург, 2005. С. 66-75.

16. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: “УНІВЕРСУМ - Вінниця”, 1998. – 195 с.