

Тараненко М. Є.
Нарижний О. Г.

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕГ-НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ З МІНІМАЛЬНИМ ЖОЛОБЛЕННЯМ

Розглянуто механізм розподілу остаточних напружень, що виникають при деформуванні листової заготовки. Моделювання процесу ЕГ-штампування проводиться для умов послідовного локального формоутворення великогабаритних деталей. Такий процес здійснюється в багатокоптурних ЕГ-пресах з багатоелектродними розрядними блоками. В цих типах пресів реалізується можливість керування навантаженням у просторі та часі. Керування здійснюється шляхом зміни місця та часу зміщення розрядів відносно один одного.

Дослідження проводилися з використанням методів численного моделювання із застосуванням програмного продукту LS-DYNA разом з методом ALE. Моделювання проводилося в тривимірній постановці з оригінальними граничними умовами.

Відзначається, що у процесі деформування заготовки трьома ЕГ-розрядами, головні деформації у точках верхньої, середньої та нижньої поверхонь заготовки значно відрізняються за величиною та місцем розташування відносно епіцентрів навантаження.

Показано, що для зниження рівня залишкових напружень, що призводять до жолоблення деталей, порожнину деталей слід формоутворювати з меншою інтенсивністю навантаження, але з більшою кількістю циклів навантаження.

Отримані результати показують, що процес деформування листової заготовки, що навантажуються імпульсним силовим полем, носить переважно коливальний характер внаслідок проходження поздовжніх і поперечних хвиль деформацій

Моделювання з малим шагом за часом ($\sim 10^{-8}$ с) показало, що деформування є складним нелінійним процесом та супроводжується коливаннями напружень з різними періодами. Для оптимізації процесу штампування необхідно узгоджувати поведінку заготовки з частотою навантаження.

Ключові слова: штампування, листові деталі, імпульсне навантаження, моделювання, напруження, деформації, жолоблення.

ВВЕДЕННЯ

У останні десятиріччя для виготовлення великогабаритних листових деталей почали використовувати двофазні деформаційно-зміцнювані сталі. Вони мають ряд позитивних властивостей, але до їх недоліків слід віднести високий ступінь післяштампувального жолоблення деталей, що визначається низькою швидкістю релаксації остаточних напружень.

Відомі то широко використовувані методи зниження жолоблення, тобто збереження заданої форми та розмірів, базуються на впливі на відштамповану деталь шляхами:

- термічному та силовому;
- ультразвуковому, електромагнітному.

Ці методи дають позитивний результат, але технологічно їх використання для виготовлення великогабаритних листових деталей доволі складне.

Загалом з цим, у низці праць [15] показано, що на деяких режимах імпульсного навантаження та деформації листових заготовок виникає інтенсивна релаксація залишкових напружень (деформацій); при цьому пластичні властивості деформованого матеріалу збільшуються.

У деяких останніх працях з фізики пластичної течії металів [6–8] робиться висновок про суто коливальний характер зародження та розповсюдження пластичних деформацій та параметри цього процесу залежать від швидкостей деформацій. Стверджується, що при резонансі вимушуваних та власних коливань збільшується пластичність, знижується спротив пластичній деформації та збільшується ступінь релаксації остаточних напружень.

Залишаються незрозумілими два питання – про значення параметрів власних коливань пластичної течії для різних матеріалів та можливості створення у тілі заготовки змушуючих коливань під дією прикладаного імпульсного навантаження.

Метою дослідження є зниження ступеня жолоблення відштампованих великогабаритних листових деталей шляхом керування параметрами навантаження при багатоімпульсному електродіравлічному штампуванні.

Вирішувані задачі – дослідити напружено-деформований стан (НДС) заготовки, що навантажується електрогідравлічними (ЕГ) розрядами у багатопорожневій розрядній камері, та визначити можливість керування параметрами навантаження.

Методи дослідження. Метод комп'ютерного моделювання у тривимірному просторі з урахуванням деформування заготовки у гетерогенному робочому об'ємі. Для оцінки адекватності використаної моделі були залучені раніш отримані експериментальні результати авторів та інших відомих праць.

Технічні схеми, що використовуються. Для концентрації енергії, що виділяється над заданими ділянками заготовки, більш простого керування енергопотоків у просторі та скорочення втрат енергії була запропонована схема багатокамерного розрядного блоку (БРБ) (рис. 1, а) [9].

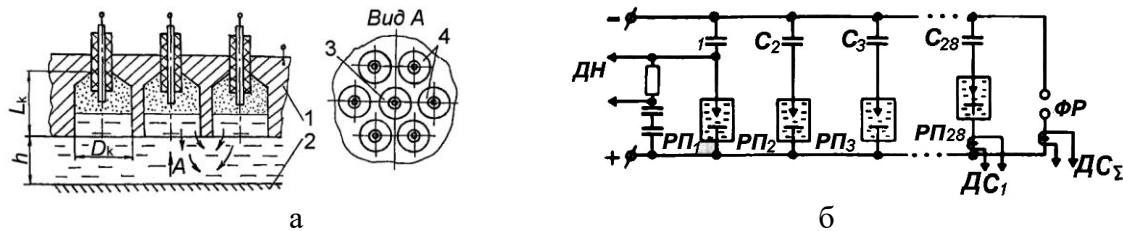


Рис. 1. Принципові схеми:

а – БРБ: 1 – розрядна камера; 2 – предмет обробки; 3 – розрядна порожнина (РП), у якій здійснюється основний розряд; 4 – шість камер, у яких здійснюються додаткові розряди; точками позначено зону парогазової порожнини (ППП); б – електрична схема комутації генератора імпульсів струму (ГІС); С – батарея конденсаторів; ФР – формуючий розрядник; РП – робочий проміжок; ДС – датчик струму; ДН – датчик напруги

Такий розрядний блок є товстою плитою, в якій виконані розрядні порожнини (камери 3 і 4). Кожна така порожнина оточена аналогічними порожнинами, що розташовані на мінімальній відстані одна від однієї. По осі порожнини встановлені робочі електроди таким чином, що розряди відбуваються між центральним стрижнем електрода та стінкою порожнини. Кожна така електродна пара підключається до окремого контуру ГІС (рис. 1, б). До складу контуру включено конденсаторну батарею, що складається з 28 окремих контурів. Паралельно контурам включений формуючий розрядник (ФР), при замиканні якого відбувається подача високої напруги одночасно на всі робочі електроди та виникають власне самі розряди.

У такій схемі можливо реалізовувати зсув за часом початку розрядів у сусідніх РП шляхом зміни міжелектродного проміжку.

Умови моделювання. Процеси імпульсного навантаження заготовки у багатеелектродних розрядних блоках суттєво відрізняються від відомих умов, описаних у низці праць [10–15]. Загальноприйнятним є використання програмного продукту LS DYNA з допомогою методу ALE. У вказаних вище працях використовується модель такої течії при одиночному ЕГ розряді у розрядній камері відносно великого об'єму, у якій розширення парогазового пухиря на початкових етапах його розвитку не обмежується жорсткими стінками розрядної камери. Це призводить до того, що заготовка навантажується інтенсивною ударною хвилею та гідропотоками з відносно малими швидкостями. Це викликано тим, що розширення ППП на перших етапах (у період інтенсивної передачі енергії до охоплюючої рідини) направлено віссесиметрично (вісі каналу розряду) однакові в усі сторони. Це призводить до втрат енергії.

У більшій частині вказаних праць заготовка вважається нерухомою або деформованою віссесиметрично відносно центральної вісі.

У разі багатоімпульсного навантаження ці умови неприйнятні. В даній роботі були прийняті інші умови.

Прийняті у даній праці умови моделювання представлені у [16–17]. Відносно розташування деяких границь у модельованій системі показано на рис. 2. Заготовка, що деформується, діаметром 320 мм встановлена на матрицю з отвором діаметром 252 мм.

Фланець заготовки притиснутий до матриці таким чином, що виключається його витягування до порожнини матриці.

Розглядається процес деформування заготовки товщиною 1,0 мм з алюмінієвого сплаву з механічними параметрами: початкове значення межі плинності 100 МПа, густина 2100 кг/м³, модуль пружності 70 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,33. Для заготовки прийнятий закон зміцнення у вигляді $\sigma_T = Ae^n$, де $A = 604.9$ МПа та $n = 0.275$.

Вивчаються параметри деформування на трьох поверхнях заготовки: верхній (що є прилеглою до рідини), серединній та нижній (що є прилеглою до матриці).

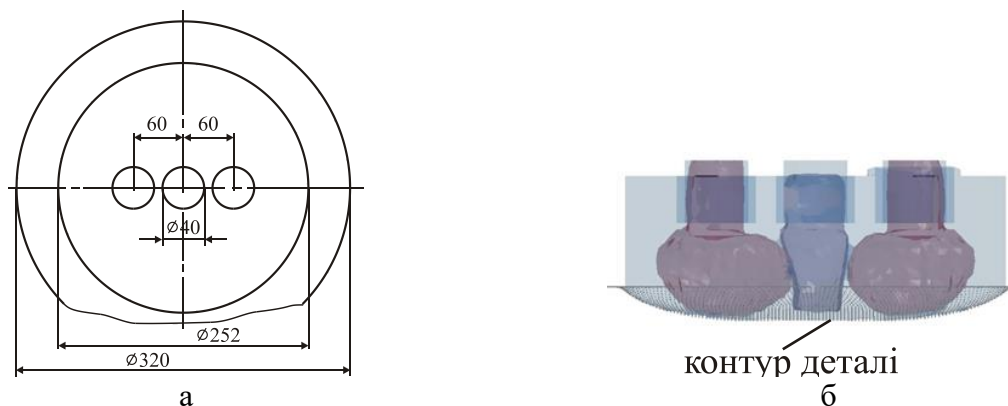


Рис. 2. Схема розташування заготовки, що деформується, ($\varnothing 320$ mm) на матриці та трьох розрядних порожнин (а); кадр 2.7 мс послідовного деформування заготовки під дією трьох ЕГ розрядів (б). Зсув у часі бокових розрядів 0,3 мс відносно центрального розряду. Дистанція розрядів до заготовки 40 мм. Енергія в кожному розряді складає 9.75 кДж

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 3 показано розподіл остаточних пластичних деформацій. Видно, що центральна частина заготовки піддана мінімальній деформації. Максимальна деформація спостерігається в районі перетяжних ребр матриці на діаметрі знаходження зони навантаження. Непереміщуваний фланець матриці також підданий пластичній деформації зі значеннями: на верхній поверхні $(2,02\dots 2,56) \cdot 10^{-2}$, серединній поверхні $(1,79\dots 1,9) \cdot 10^{-2}$ та нижній поверхні $(2,4\dots 2,6) \cdot 10^{-2}$. Тобто пластична деформація зовнішніх поверхонь більше ніж на серединній поверхні.

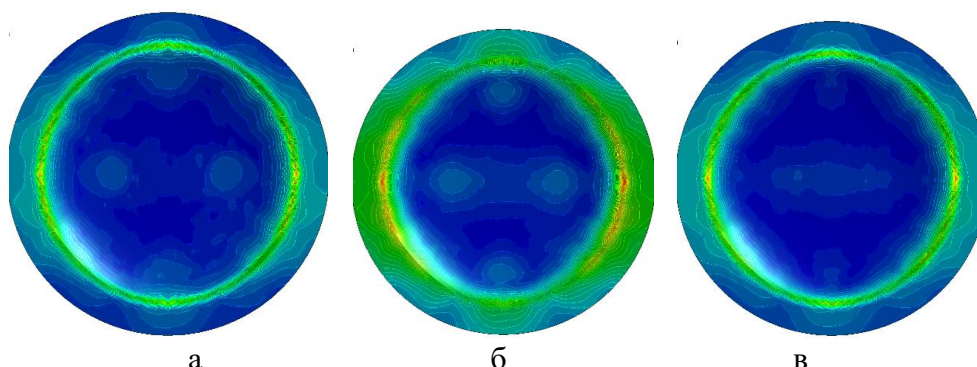


Рис. 3. Розподіл остаточних пластичних деформацій на поверхнях заготовки у момент часу 2.7 мс: а – нижня поверхня ($\max \varepsilon = 0.076$, $\min \varepsilon = 0.05$); б – середня поверхня ($\max \varepsilon = 0.040$, $\min \varepsilon = 0.003$); в – верхня поверхня ($\max \varepsilon = 0.082$, $\min \varepsilon = 0.001$)

На рис. 4 приведена кінетика розвитку пластичних деформацій на різних поверхнях заготовки. Максимальні значення деформацій спостерігаються на нижній поверхні заготовки, а її швидкість зміни досягає значень $32,7 \text{ с}^{-1}$. Швидкості деформацій на інших поверхнях значно нижчі.

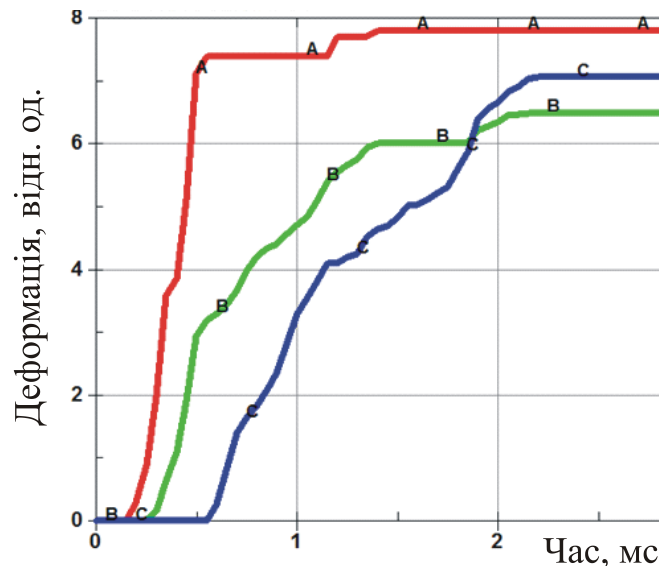


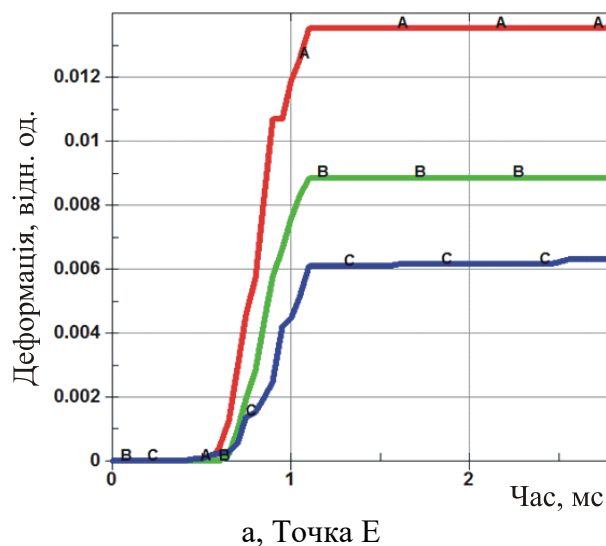
Рис. 4. Залежність величини пластичних деформацій від часу для центральної точки заготовки D (див. рис. 6):

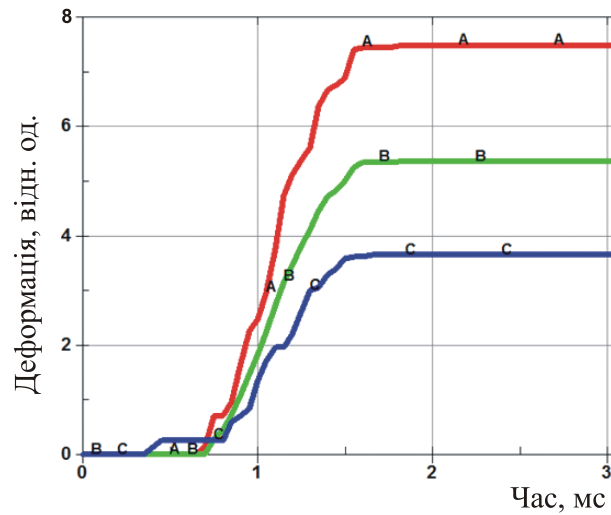
А – нижня поверхня, В – серединна поверхня, С – верхня поверхня

Всі залежності мають неспадаючий характер. Це фізично цілком пояснювано для центральної точки штампованої круглої заготовки. На кінцевій стадії розрахунку спостерігається плато, що пояснюється завершенням пластичного деформування. Слід відзначити різницю затримки початку та кінця пластичних деформацій для різних поверхонь заготовки. Це, мабуть, викликано впливом згину – деформація плине з різними швидкостями. Величина деформації на верхній поверхні до моменту 1,9 мс нижче деформацій на серединній поверхні, а потім співвідношення значень змінюється.

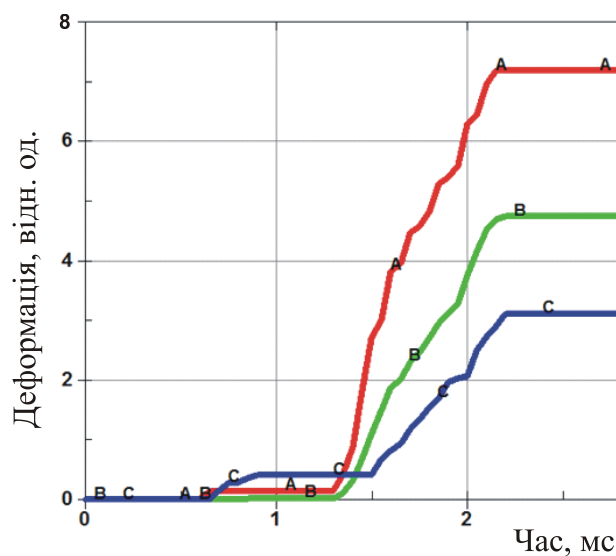
На рис. 5 показана кінетика розвитку головних максимальних напружень в центрі заготовки на трьох поверхнях.

Пластичні деформації зароджуються у центрі заготовки, у місці появи початкового збурення, та розповсюджуються від нижньої поверхні до верхньої на протязі $\sim 0,5$ мс, накопичуються послідовно з різною швидкістю до максимальних значень. Далі з'являється плато. Рівні плато мають різні значення величини пластичної деформації. Різниця у рівнях плато для різних точок заготовки є різною. Мінімальне значення різниці у рівнях спостерігається у центральній точці (D, рис. 4), а максимальне – у точках інтенсивного навантаження (E та F, рис. 4). По мірі віддалення від цієї зони різниця у величинах накопленої пластичної деформації зменшується (точка GG).





б, Точка F



в, Точка G

Рис. 5. Залежності накоплення пластичних деформацій для різних точок заготовки від часу: А – нижня поверхня, В – середина поверхня, С – верхня поверхня

Розташування точок показано на рис. 6

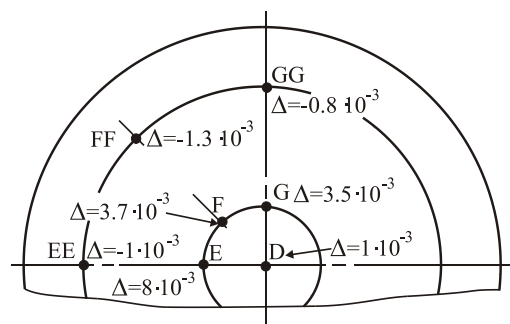


Рис. 6. Характер розповсюдження різниці накопчених пластичних деформацій на випуклій та увігнутій поверхнях заготовки при штампуванні трьома ЕГ розрядами (два бокових розряди зсунуті за часом відносно центрального на 300 мкс). Діаметр заготовки 320 мм, діаметр отвору у матриці 252 мм. Товщина заготовки 1,0 мм, матеріал – алюмінієвий сплав. Δ – різниця у рівнях плато (див. рис. 5). Знак (-) означає перевищення пластичних деформацій на увігнутій поверхні заготовки

На рис. 7 показано кінетику розвитку максимальних головних напружень у центрі заготовки на трьох поверхнях.

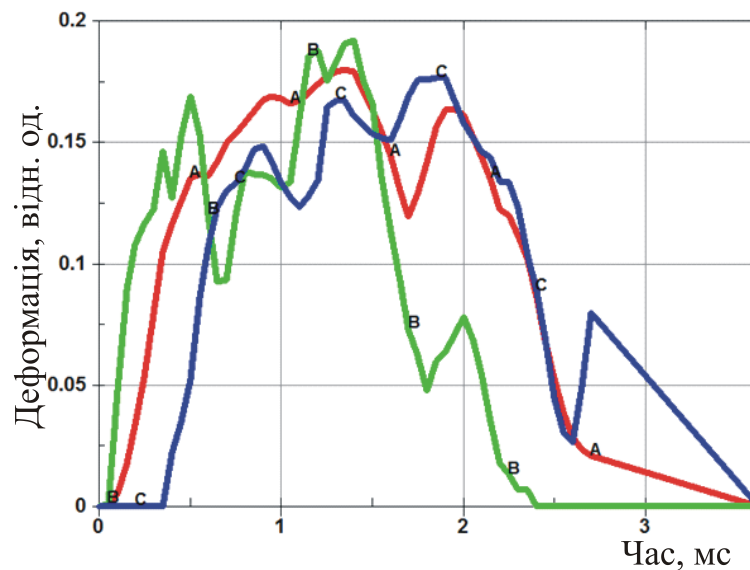


Рис. 7. Залежність розвитку максимальних головних напружень від часу у центрі заготовки на трьох поверхнях:

A – серединна поверхня, B – нижня поверхня, C – верхня поверхня

Якщо припустити, що ця різниця характеризує рівень остаточних пружних напружень, то можна вважати, що рівень остаточних пружних напружень, що призводить до жолоблення, є меншим у зонах з меншою інтенсивністю навантаження.

Загальний характер усіх залежностей – ріст до максимальних значень и падіння до нуля. Але всі залежності носять коливальний характер з різними періодами коливань.

Швидкість росту напружень на початковій ділянці приблизно однакова, але швидкість їх падіння різна. У діапазоні часу процесу 0,5...2,0 мс спостерігаються інтенсивні коливання величин головних напружень на усіх поверхнях. Але найбільше значення головних максимальних напружень реалізується на нижній поверхні заготовки.

На рис. 8 приведена кінетику розвитку максимальних напружень зсуву у центрі заготовки на трьох поверхнях. Слід відзначити затримання розвитку напружень на рис. 5, 6, що пояснюється скінченністю швидкості розповсюдження хвиль тиску у рідині. Самі залежності напружень від часу носять нелінійний коливальний характер. Це можна пояснити складним характером взаємодії коливального навантаження та хвильовим характером розповсюдження збурень в матеріалі заготовки. Явно виражені періоди коливань 115...120 мкс та 460...500 мкс, що є свідомством про додавання, як мінімум, двох коливальних процесів.

Для оцінки можливостей керування деформаційними параметрами був промодельований процес навантаження одиночним розрядом, що проводиться у центрі заготовки.

Залежність інтенсивності пластичних деформацій від часу приведена на рис. 8. Работка розглядається як єдине ціле.

У цьому розрахунковому варіанті було змінено тривалість виділення енергії 16 мкс (зменшено у два рази у порівнянні з основним варіантом), а енергія збільшена у два рази. Для т. А, що знаходиться у центрі заготовки, помітно зростання величини пластичної деформації у порівнянні з базовим варіантом (виділена енергія 9,75 кДж та тривалість виділення 32 мкс) та швидкості пластичної деформації. Для т. А вона дорівнює 1400 с^{-1} , для точки на відстані 27 мм всього $1,4 \text{ с}^{-1}$.

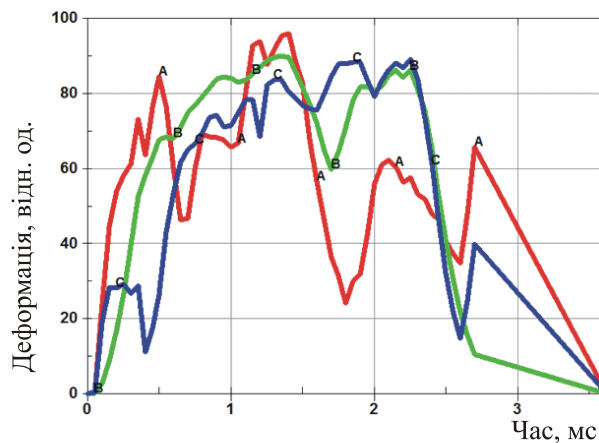


Рис. 8. Залежність розвитку максимальних напружень зсуву від часу у центрі заготовки на трьох поверхнях: А – нижня поверхня, В – серединна поверхня, С – верхня поверхня

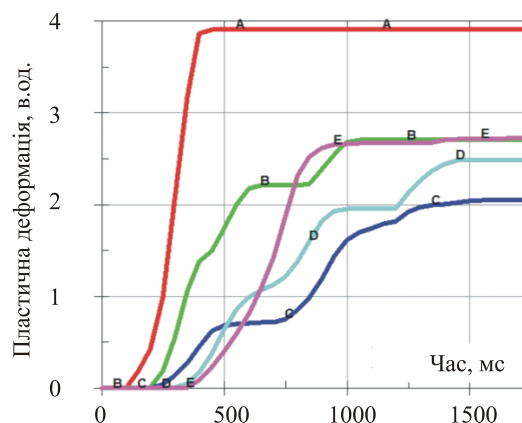


Рис. 9. Залежність інтенсивності пластичних деформацій від часу (для відповідних точок заготовки при подвоєній розвинутій потужності. Час виділення енергії 16 мкс. Крок точок ~ 27 мм

На основі таких порівнянь за серією варіантів навантаження був зроблений висновок про можливість реалізації широкого діапазону деформаційних параметрів шляхом керування кількістю та швидкістю виділення енергії, зміни режиму розряду (аперіодичний чи коливальний) та геометричних параметрів зони навантаження. Керування переліченими параметрами технічно просто на багатоконтурних ЕГ-пресах.

ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ТЕХПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ З МІНІМАЛЬНИМ ЖОЛОБЛЕННЯМ ДЕТАЛЕЙ

У вказаних вище працях [2–6] експериментально показано можливість отримання різнотипних деталей з дуже малим ступенем жолоблення після формоутворення. Але в них не приведено характеристики деформування як функції часу, а лише стверджується факт зниження остаточних напружень. У працях Г. А. Гулого [1] та Кривицького Є. В. [18] задекларовано зниження остаточних напружень після ЕГ-обробки листових деталей. У них також не відзначено режими обробки, при яких ефект релаксації остаточних напружень (або їх виникнення на мінімальному рівні) помічається найбільш яскраво.

У фундаментальній праці Дж. Ф. Белла [19] експериментально доведена немонотонна залежність радіальних напружень σ_r , що виникають при торцьовому ударі жорсткого стержня об інший (м'який). При цьому спостерігаються практично симетричні коливання σ_r коло теоретичного значення зі середнім періодом 11,6 мкс та амплітудою $(0.1 \dots 0.25) \sigma_r$ для алюмінієвих зразків. Для зразків з полікристалічної міді період дорівнював $5 \dots 6$ мкс, а амплітуда – $0.56 \sigma_r$. Значення кінцевих відносних деформацій дорівнювали $1,5 \dots 2,0\%$, рідше до 3% .

У працях Дж. Ф. Белла не досліджувались повторні навантаження та, більш того, у режимі резонансу. Проте, це перші експериментальні дані про параметри коливального процесу, що виникає при ударному навантаженні. У низці праць Л.Б. Зуєва, зокрема [7], теоретично та експериментально обґрунтовано механізм передачі пластичної деформації завдяки автохвилям локалізованої пластичної течії. Часові та геометричні масштаби цього явища складають $10^2 \dots 10^3$ с та 10^{-2} м. Але ці значення отримані при постійному навантаженні та у великому ступені залежать від режиму деформування.

У праці В.П. Северденко [4] показано, що накладення вібрації визначеного діапазону на процес статичного штампування знижує спротив деформуванню та рівень остаточної напруженості. Такий діапазон частот для деяких штампувальних матеріалів визначено у районі 16 кГц або періоді коливань ~ 40 мкс.

Є. В. Кузнецовим [8] визначено ширину полоси частот, у яких найбільш помітно проявляється дія резонансного вібропластичного ефекту. При цьому ефекті знижується спротив деформуванню, знижуються остаточної напруження у матеріалі, що деформується, і, як слідство, малий ступінь післяопераційного жолоблення деталі. Більш яскраво резонансний вібропластичний ефект, за словами автора, при відношенні частот навантаження та власної частоти зсувно-релаксаційного процесу, що дорівнює одиниці. Ширина сприятливої зони полоси частот залежить від рівня навантажувальних зусиль (напружень у деталі, швидкості деформування та часу). Власна частота зсувно-релаксаційних процесів автором визначена у діапазоні: алюміній AD1 – 157,08 рад/с, сталь 12X18H9T – 44,88 рад/с. Залежності полоси частот від швидкості деформування у праці не приведено.

В.М. Косенковим у працях [20, 21] показано результати експериментального дослідження залежності періоду релаксації остаточної напруженості (величина зворотна відповідній частоті) від швидкості деформації. Але приведені чисельні значення періоду релаксації для подібних металів значно відрізняються – від одиниць до сотень мкс.

Загальним для розглянутого складу праць є наступне:

- при вібропластичному навантаженні відповідної інтенсивності заготовки, що деформується, помітно зниження спротиву пластичному деформуванню та зменшення рівня остаточної напруженості;
- існує діапазон значень періодів вібропластичного навантаження, у якому більш яскраво проявляються його позитивні наслідки. Межі цього діапазону для різних металів визначаються від декількох мкс до 200...300 мкс;
- діапазон швидкостей пластичних деформацій, у якому проявляється ефект вібропластичності, можна визначити як $0 \dots 1500$ с⁻¹;
- при листовому формозмінненні необхідно прагнути до реалізації більших значень напружень деформування.

Виходячи з цих висновків стане ясним, що для зниження ступеня жолоблення необхідно створювати у штампованій заготовці умови для реалізації коливального процесу з визначеними частотами та інтенсивністю. Таке навантаження слід проводити у ЕГ-установках багатоелектродних конструкцій. Частота, що генерує автоколивання, за попередньою оцінкою повинна знаходитися у діапазоні 16 ± 100 % для більшості штампованих матеріалів. У теперішній час для конкретних матеріалів слід звужувати полосу необхідних частот дослідним шляхом.

Керування частотою вібронавантаження у багатоконтурних ЕГ-установках можливо кількома методами:

- керування тривалістю виділення енергії шляхом зміни ємності, індуктивності розрядного контуру та величини міжелектродного проміжку;
- зміщенням за часом початку керувальних розрядів відносно основного.

Для прикладу на рис. 10 показано залежності швидкостей переміщення окремих точок заготовки від часу при різних кількостях виділеної енергії. Як видно, помітно змінюється система коливальних процесів у заготовці. Але при цьому трапляється коливальне зміщення поверхні заготовки (див. рис. 2 та 3).

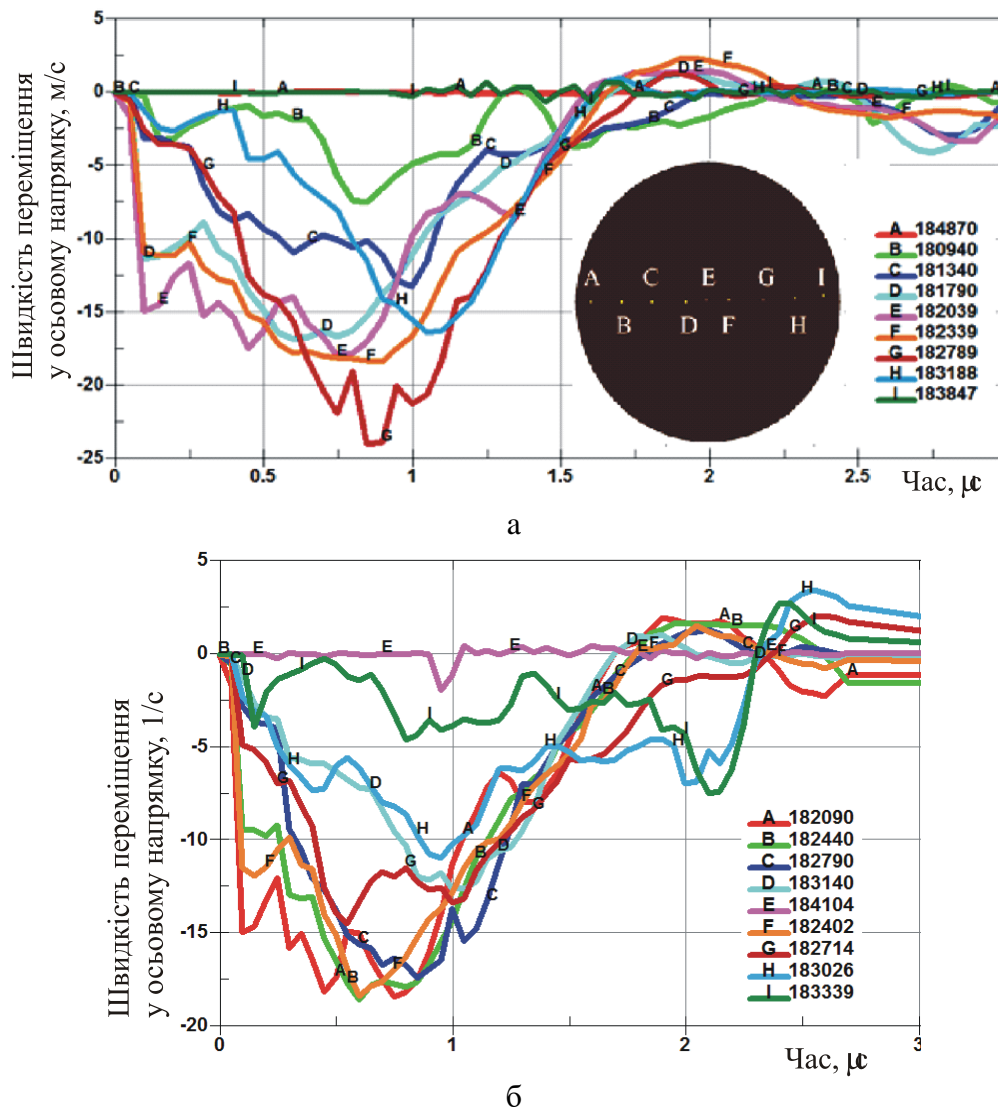


Рис. 10. Залежності переміщень контрольних точок заготовки від часу:
 а – виділення 100% енергії у кожній порожнині; б – виділення 50% енергії у кожній боковій порожнині, 300 μс

При відносно невеликій та короткій зміні виділеної енергії, як показують чисельні експерименти, суттєвим образом змінюються пластичні деформації та їх швидкості.

Керування місцем підключення окремих груп електродів до генератора імпульсів току можна створювати прийнятні умови деформування на окремих ділянках заготовки, таким чином забезпечувати отримання всієї деталі з заданими технічними вимогами.

ВИСНОВКИ

1. Показана можливість управління параметрами деформування заготовки на багатоелектродних ЕГ-пресах для отримання мінімального жолоблення великогабаритних листових деталей. Призначення керувальних параметрів для створення вібро-релаксаційного режиму деформування технічно нескладно.

2. Розроблена математична модель процесів виникнення та розповсюдження пластичних деформацій у листовій заготовці під дією багатоімпульсного навантаження демонструє нестационарний коливальний характер цих процесів, у яких спостерігаються поздовжні та поперечні хвилі. Параметрами цих коливань (амплітудою та періодами) можна керувати. Шляхом підбору режиму виділення енергії (параметрів багатоімпульсного навантаження, потужності та місця виділення енергії) можна забезпечити оптимальну швидкість деформації та розподіл деформацій для отримання якісних деталей.

3. Для исключения необходимости дослідного відпрацювання техпроцесів штампування без значного ступеню жолоблення необхідно знання динамічних властивостей деформування використовуваних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев : Наукова думка. 1990. 208 с.
2. Старков Н. В., Стрелковская Л. И. Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали. Вісник НТУ «ХП». Сер. *Техніка та електрофізика високих напруг*. Харків : НТУ «ХП». № 35 (1260). 2017. С. 79–83.
3. Мериин Б. В., Корнет И. Ф., Савулькин Д. Е. Эффективность электрогидравлической правки нежестких деталей при разных условиях нагружения. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. № 10. С. 13–15.
4. Северденко В.П., Пащенко В.С., Кособуцкий В.С. Листовая штамповка с ультразвуком. Минск : Наука и техника. 1975. 192 с.
5. Тараненко М.Е. Метод снижения коробления листоштампованных деталей. Сб. науч. трудов *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2018. №1 (46). С. 100–104.
6. Дідик Р. П., Кузнецов С. В., Забара В. М. Фізичні основи міцності: Підручник. Дніпропетровськ : Наука та освіта. 2005. 608 с.
7. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. Москва : Физматлит. 2018. 202 с.
8. Кузнецов Е.В. Условия возникновения в металлах вибропластического резонанса. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2002. №2. С. 6–9.
9. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудования и технологические процессы (монография). Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т. 2011. 272 с.
10. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021. 5. 47. 20 p., DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.
11. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.
12. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math.* 132:8. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>.
13. Dariani B.M., Liaghat G.H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. J. Eng. Manuf.* 2009. 223. pp. 703–712, DOI: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>.
14. Mamutov V., Mamutov A., Golovaschenko S. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA. *13 International LS-DYNA users Conference. Metal Forming*. Dearborn. June 8-10. 2014. 9 p. DOI: <https://www.dynalook.com/conferences/13th-international-ls-dyna-conference/metal-forming/simulation-of-high-voltage-discharge-channel-in-water-at-electro-hydraulic-forming-using-ls-dyna-r>.
15. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 219 (2015). pp. 84–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>.
16. Нарыжный А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта. Сб. науч. тр. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* : Харьков. Нац. аэрокосм ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Вып. 54. 2012. С. 62–67.
17. Нарыжный А. Г., Тараненко М. Е. Механические процессы в системе с погружной электрогидравлической камерой. Эксперименты и моделирование. Сб. науч. тр. *Обработка металлов давлением*. Краматорск. ДГМА. № 2 (49). 2019. С. 136–142. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)136.
18. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев : Наукова думка. 1986. 206 с.
19. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть I. Малые деформации. Пер с англ. Под ред. А.П. Филина. Москва : Наука. 1984. 600 с. Часть II. Конечные деформации. Пер с англ. Под ред. А.П. Филина. Москва : Наука. 1984. 432 с.
20. Косенков В.М., Бычков В.М. Метод определения реологических и энергетических характеристик ударного сжатия металлов. Новосибирск. *ПМТФ*. 2012. Т. 53. №6. С. 134–143.
21. Косенков В.М. Определение релаксационных и дислокационных характеристик металлов по диаграммам ударного сжатия. Новосибирск. *ПМТФ*. 2014. Т. 55. №4, С. 33–42.

REFERENCES

1. Hulyi G.A. Scientific fundamentals of discharge-impulse technologies. Kyev : Scientific thought. 1990. 208 p. (in Russian).

2. Starkov N.V., Strelkovskaya L.I. Experimental researches of impulse electro-hydraulic calibration of sheet articles of high-strength steel. *Visnik NTU KhPI Engineering and Electro-Physics of High Voltage*. Kharkiv : NTU «KhPI», № 35 (1260). 2017. pp. 79–83. (in Russian).
3. Meriin B. V. Kornet I. F., Savulkin D. E. Efficiency of electro-hydraulic correction of low-rigidity articles at different loading conditions. *Forging and Stamping Production*. 1990. № 10. pp. 13–15. (in Russian).
4. Severdenko V.P., Pachshenko V.S., Kosobutskiy V.S. Sheet forming with ultrasound. Minsk: Science and Engineering. 1975. 192 p. (in Russian).
5. Taranenko M.Ye. Method of reduction of warping of sheet-formed articles. *Materials working by pressure*. Kramatorsk. DSEA. 2018. №1 (46). pp. 100–104. (in Russian).
6. Didyk R. P., Kuznetsov Ye. V., Zabara V. M. Physical fundamentals of strength: Handbook. Dnipropetrovsk : Science and Education. 2005. 608 p. (in Ukrainian).
7. Zuev L.B. Auto-waved plasticity. Localization and collective modes. Moscow : PhysMatLit. 2018. 202 p. (in Russian)
8. Kuznetsov Ye. V. Conditions of appearing of vibro-plastic resonance in metals. *Forging and Stamping Production. Materials working by pressure*. 2002. №2, pp. 6–9. (in Russian).
9. Taranenko M.Ye. Electrohydraulic forming: theory, equipment and technological processes (monography). Khrkov. Nat. Aersp. Univ. 2011. 272 p. (in Russian).
10. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021. 5. 47. 20 p., DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.
11. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.
12. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math*. 132:8. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>.
13. Dariani B.M., Liaghat G.H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. J. Eng. Manuf.* 2009. 223. pp. 703–712, DOI: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>.
14. Mamutov V., Mamutov A., Golovaschenko S. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA. *13 International LS-DYNA users Conference. Metal Forming*. Dearborn. June 8-10. 2014. 9 p. DOI: <https://www.dynalook.com/conferences/13th-international-ls-dyna-conference/metal-forming/simulation-of-high-voltage-discharge-channel-in-water-at-electro-hydraulic-forming-using-ls-dyna-r>.
15. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 219 (2015). pp. 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>.
16. Naryzhnyi O. G. Computational model of electrohydraulic effect. *Open information and computer integrated technologies* : Kharkov. Nat. Aersp. University “KhAI”. Issue. 54. 2012. C. 62–67. (in Russian).
17. Naryzhnyi O. G., Taranenko M. Ye. Mechanical processes in the system with immersed electrohydraulic chamber. Experiments and modelling. *Materials working by pressure*, Kramatorsk. DSEA. № 2 (49). 2019. pp. 136–142. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)136. (in Russian).
18. Kryvitskiy Ye.V. Dynamics of electro-explosive in liquid. Kiev : Scientific thought. 1986. 206 p. (in Russian).
19. Bell J. F. Experimental fundamentals of mechanics of deformable solids. In 2 vol. Vol. I. Low deformations. Translated form English. Edited by A.P. Filin. Moscow : Science. 1984. 600 p. Part II. Finite deformations. Translated form English. Edited by A.P. Filin. Moscow : Science. 1984. 432 p. (in Russian).
20. Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Method of determination of rheological and energy characteristics of impact compression of metals. Novosibirsk : *PMTF*. 2012. Vol. 53. №6. pp. 134–143. (in Russian).
21. Kosenkov V.M. Determination of relaxation and dislocation characteristics of metals by diagrams of impact compression. Novosibirsk : *PMTF*. 2014. Vol. 55. №4, pp. 33–42. (in Russian).

Taranenko M., Naryzhnyi O. Controlling parameters of electro-hydraulic loading at forming of sheet articles with minimal warping

Mechanism of distribution of residual stress, which appear at sheet article deformation, is considered. Modelling of electro-hydraulic (EH) forming is conducted for conditions of consequent local changing of shape of large-dimensional articles. This process is conducted in multi-contour electrohydraulic presses with multi-electrode discharge blocks. In presses of this type possibility of loading control in space and time is realized practically. Controlling of process is conducted by means of changing place and time of electrical discharges shifting with respect to each other.

Researches were conducted by means of application of numerical modelling with LS-DANA software and together with ALE method. Modelling was done in 3D-formulation with specific boundary conditions.

It is mentioned that at blank deformation by triple EH-discharges principal strains at points on upper, middle and lower blank surfaces differ by value and place of location with respect to loading epicenters.

It is shown that for reduction level of residual stress which lead to article warping one has to create cavity of an article with less intensive loading but with higher amount of loading cycles.

Results obtained are shown that the process of sheet blank deformation loaded with impulse loading field has mainly oscillative character due to passing longitudinal and lateral waves of deformation.

Modelling with short increment by time ($\sim 10^{-8}$ sec) has revealed that article deformation is complicated non-linear process and is accompanied with stress oscillations having different periods. To optimize forming process it is necessary to adjust blank behavior with loading frequency.

Key words: forming, sheet articles, impulse loading, modelling, stress, strain, warping.

Тараненко М. Е., Нарыжный А. Г. Управление параметрами электрогидравлического нагружения для штамповки листовых деталей с минимальным короблением

Рассмотрен механизм распределения остаточных напряжений, которые возникают при деформировании листовой заготовки. Моделирование процесса ЭГ-штамповки проводится для условий последовательного локального формоизменения крупногабаритных деталей. Такой процесс осуществляется в многоконтурных ЭГ-прессах с многоэлектродными разрядными блоками. В этих типах прессов реализуется возможность управления нагружением в пространстве и времени. Управление осуществляется путем изменения места и времени смещения разрядов относительно друг друга.

Исследования проводились с использованием методов численного моделирования с применением программного продукта LS-DYNA совместно с методом ALE. Моделирование проводилось в трехмерной постановке с оригинальными граничными условиями.

Отмечается, что в процессе деформирования заготовки тремя ЭГ-разрядами, главные деформации в точках верхней, срединной и нижней поверхностей заготовки значительно отличаются по величине и месту расположения относительно эпицентров нагружения.

Показано, что для снижения уровня остаточных напряжений, которые приводят к короблению деталей, полость деталей следует формообразовывать с меньшей интенсивностью нагрузки, но с большим количеством циклов нагружения.

Полученные результаты показывают, что процесс деформирования листовой заготовки, нагружаемой импульсным силовым полем, носит преимущественно колебательный характер вследствие прохождения продольных и поперечных волн деформаций.

Моделирование с малым шагом по времени ($\sim 10^{-8}$ с) показало, что деформирование является сложным нелинейным процессом и сопровождается колебаниями напряжений с разными периодами. Для оптимизации процесса штамповки необходимо согласовывать поведение заготовки с частотой нагружения.

Ключевые слова: штамповка, листовые детали, импульсная нагрузка, моделирование, напряжение, деформации, коробление.

Тараненко Михайло Євгенович – д-р техн. наук, проф. НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковського

Taranenko Mykhailo – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of NAU “KhAI”

Тараненко Михаил Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковського

E-mail: m.taranenko@khai.edu

ORCID: 0000-0003-4126-0979

Нарыжный Олександр Георгійович – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковського

Naryzhnyi Olexandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor of NAU “KhAI”

Нарыжный Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доцент НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковського

E-mail: o.naryzhniy@khai.edu

ORCID: 0000-0002-5379-1964

НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковського – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» ім. М. Є. Жуковського, м. Харків

NAU “KhAI” – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv

НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковського – Национальный аэрокосмический университет «Харьковский Авиационный институт» им. Н. Е. Жуковського, г. Харьков

Статья поступила в редакцию 10.05.22 г.