

Рудасьов В.Б.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Якубовський О.М.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Головіна О.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

ЗУСИЛЛЯ ПРИТИСКУ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

У статті розглянуто технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготовки та інструменту, спрямовані на підвищення штампування сталей підвищеної міцності, які використовуються для виготовлення кузовних деталей для автомобілів. У роботі запропоновано аналізувати напружено-деформований стан заготовки при зміні зусилля притиску під час процесу листового штампування. Дослідження проводилися із заготовками з маловуглецевих сталей (08Ю, 08кп) та низьколегованих сталей типу 08ГСЮТ(Ф). Для кожної заготовки було визначено граничні значення коефіцієнта граничної деформації. Результати експерименту були оброблені за допомогою вторинного методу математико-статистичного аналізу, в ході якого визначено здатність сталі підвищеної міцності до штампування, що характеризується коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску. Для цього при обробці результатів вимірювань були встановлені залежності між коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску, між коефіцієнтом граничної деформації та тиском притиску для різних сталей. На підставі отриманих залежностей проаналізовано вплив тиску притиску на гофроутворення та величину коефіцієнта граничної деформації та встановлена область можливого штампування, тобто область значень тиску притиску, де процес штампування заготовок різних сталей проходить без гофроутворення та руйнування. Практичним висновком отриманої залежності між коефіцієнтом граничної деформації і тиску притиску є рекомендація про вибір при штампуванні мінімального значення тиску притиску. Залежність між коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску дозволила встановити граничні значення зусилля притиску заготовки у процесі листового штампування для трьох областей: області якісних виробів, області гофроутворення, області руйнування. Запропонований метод аналізу напружено-деформованого стану матеріалу під час процесу штампування листової сталі при різних значеннях зусилля притиску дозволяє досягти необхідного рівня штампування листових сталей підвищеної міцності.

Ключові слова: листові сталі підвищеної міцності, автомобілебудування, напружено-деформований стан, зусилля притиску при штампуванні.

Постановка проблеми. Розвиток автомобілебудування неможливий без подальшого вдосконалення технологічних процесів металообробки та методів, що визначають можливість отримання кузовних деталей з набором необхідних властивостей.

У роботі [1] встановлено, що використання сталей підвищеної міцності (СПП) дозволить вирішувати проблеми, пов'язані з безпекою, екологічністю та матеріаломісткістю у автовиробників. Авторами зазначено, що СПП, мають дещо меншу здатність до штампування в порівнянні з маловуглецевими сталями вищих категорій витяжки. На сьогодніш-

ньому етапі розвитку виробництва кузовних деталей автомобілів штампуванням поєднувати високу пластичність сталі з підвищенням міцності навряд чи можливо. Тому, подальші дослідження було запропоновано направити на розробку технологічних заходів, які дадуть можливість підвищити штампування цих сталей.

Здатність матеріалу деформуватися без руйнування при формозмінних операціях листового штампування залежить від багатьох факторів: технологічності конструкції виробу; механічних та технологічних властивостей матеріалу; показників технологічного процесу (точності, стабіль-

ності, продуктивності, економічності); сили тертя у процесі витяжки, зусилля притиску, температури інструменту та металу, форми інструменту; конструкції штампкової оснастки. Така багатofакторність пропонує багато шляхів підвищення здатності сталей до штампування. В першу чергу це технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготівлі та інструменту, що безпосередньо впливають на напругу в металі.

Підвищення штампування сталей підвищеної міцності є комплексною проблемою, що охоплює металургійне і листопрокатне виробництво, роботу пресових цехів автомобільних заводів і конструкторських бюро.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Під час виконання листового штампування оцінка штампування пов'язана з труднощами встановлення локальних деформацій, що призводять до порушення процесу формозміни в цілому. Важливе значення при цьому набувають як експериментальні так і теоретичні методи дослідження.

Теоретичні методи дослідження впливу зусилля притиску при операціях штампування-витягу розглядалися багаторазово [2-8].

У конкретних умовах штампування для визначення можливостей формозмін заготівлі використовують технологічні випробування, які дозволяють проводити експериментальні дослідження здатності матеріалу до штампування. Під час проведення формозмінювальних операцій не допускається нерівномірне збільшення розмірів у різних напрямках (фестонів), утворення надривів та тріщин, розкриття дефектів металургійного походження (пор, раковин тощо). При випробуванні важливою умовою є мінімізація пружного пружиніння.

Однак у сучасній літературі недостатньо представлено досліджень впливу притиску при штампуванні-витягу тонколистового прокату підвищеної міцності.

Так, наприклад, у джерелі [9] розглядалося питання удосконалення способу листового штампування, а саме операції витягу, при здійсненні якої можна плавно, в процесі витягування регулювати зусилля притиску фланця плоскої заготовки в залежності від поточного значення ходу повзуна. При цьому була запропонована конструкція механічного преса для штампування, в якому з'єднання притискного повзуна з повзуном, що та витягує здійснюється за допомогою гідравлічних циліндрів. У цьому випадку необхідно перебудувати вже існуюче штампове обладнання в пресових цехах автомобільних заводів, що є економічно недоцільним.

Аналіз показує, що проблема підвищення штампування сталей підвищеної міцності при

виготовленні кузовних деталей автомобілів досі залишається актуальною.

Постановка завдання. Розробка комплексу заходів з метою підвищення здатності сталей підвищеної міцності до штампування за рахунок зміни зусилля притиску в процесі листового штампування з подальшим аналізом напружено-деформованого стану заготівлі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час витягу деталі з листової заготівлі змінюються геометричні розміри і напружено-деформований стан фланця [10,11], що призводить до зміни величини тиску притиску q , МПа, яке можна визначити за формулою

$$q = Q_{\text{пр}} / F, \quad (1)$$

де $Q_{\text{пр}}$ – зусилля притиску, Н;
 F – площа кільця між притиском і матрицею в цей період часу, мм².

Розрахункове зусилля притиску заготівлі до поверхні матриці доки ще не може бути проконтрольоване у виробничих умовах (принаймні, в пресових виробництвах Кременчуцького і Запорізького автозаводів) через відсутність контрольних приладів на витяжних пресах. Тому оптимальне зусилля притиску встановлюється безпосередньо перед витягом експериментально по відсутності складок або розривів металу. Зусилля притиску, що забезпечує стійкість фланця, зазвичай у виробничих умовах є дещо завищеним. Зменшення (збільшення) його до величини, визначуваної з умови стійкого фланця, понизить напругу в небезпечному перерізі і розширить можливості процесу витягу.

Визначити граничну деформацію, яка характеризує здатність до штампування листових сталей при штампуванні-витягу, можна, встановивши взаємозв'язок між граничною напругою, що викликає руйнування металу, з одного боку, і формою інструменту, властивостями металу і умовами тертя, з іншою. На практиці для цього застосовуються різні методи модельного штампування виробів простої форми [10, 13].

У теорії листового штампування [12, 15], при визначенні загальної напруги втягування заготівлі в матрицю, визначувана формулою

$$\sigma_{\text{заг}} = \sigma_{\rho} + \sigma_{\text{изг}} + \sigma_{\text{тр.ф}} + \sigma_{\text{тр.м}}, \quad (2)$$

де σ_{ρ} – нормальна розтягуюча напруга, діюча в радіальному напрямі фланця, затиснутого між притиском і матрицею, МПа;
 $\sigma_{\text{виг}}$ – напруга вигину на матриці на вході і виході, МПа;
 $\sigma_{\text{тр.ф}}$ – напруга тертя у фланці, МПа;
 $\sigma_{\text{тр.м}}$ – напруга тертя на закругленні матриці, МПа,

одним з доданків цієї напруги є напруга, викликана тертям між заготівлею, притиском і матрицею на плоскій його частині (рис. 1), тобто $\sigma_{тр,ф}$.

Величина $\sigma_{тр,ф}$ в загальній напрузі складає приблизно 15% [3], що говорить про важливість обліку його при операціях штампування-витягу і припускає ретельну наладку штампового устаткування, в плані тиску притиску.

Найдемо напругу, викликану тертям у фланці під дією зусилля притиску. Розглянемо переріз 1-1 (рис. 1).

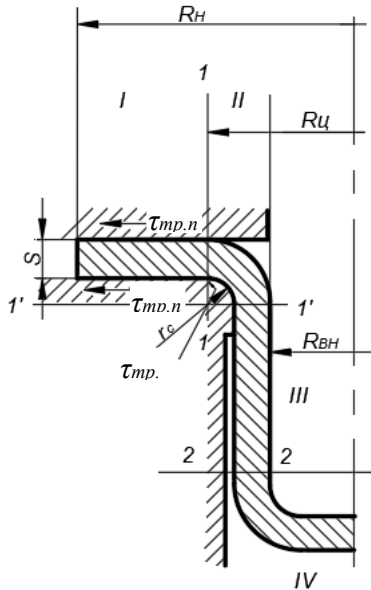


Рис. 1. Схема розподілу зон деформації і напруги у стакані при витягу:

- I – зона пластичної деформації;
- II – зона пластичного вигину; III – зона пружної деформації; IV – зона руйнування

З визначення напруги можна записати

$$\sigma_{тр,ф} = P_{тр} / F_{1-1}, \quad (3)$$

де $P_{тр}$ – сила тертя, Н;
 F_{1-1} – площа заготівлі в перерізі 1-1, мм².

$$F_{1-1} = 2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S, \quad (4)$$

де $R_{ц}$ – відстань (радіус) від центру стакана до перерізу 1-1, мм;
 r_c – радіус матриці, мм;
 S – товщина заготівлі, мм.

У свою чергу, повна сила тертя, діюча на поверхні фланця, може бути визначена за формулою:

$$P_{тр} = \tau_{тр} \cdot F_k, \quad (5)$$

де $\tau_{тр}$ – дотична напруга тертя на контактній поверхні, МПа;

$$F_k = \pi \cdot R_n^2 - \pi \cdot R_{ц}^2 = \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2). \quad (6)$$

Слід звернути увагу на те, що контактні умови тертя у фланці і на згині матриці (див. рис. 1) істотно

різні за величиною тиску, що зумовлює їх опис різними функціями. Як було встановлено [14], при тисках 40-50 МПа, а між притиском і матрицею при штампуванні-витягу встановлюється тиск в цих межах, досить точно виконується закон Амонтона

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot q, \quad (7)$$

де $f_{тр}$ – коефіцієнт тертя;
 q – тиск притиску, МПа.

Підставивши формули (6) і (7) у формулу (5) отримаємо повну силу тертя, діючу на поверхні фланця

$$P_{тр} = f_{тр} \cdot q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2). \quad (8)$$

Підставляючи формули (8), (4) у формулу (3) і враховуючи, що заготівля затиснута з двох сторін, отримаємо

$$\sigma_{тр,ф} = \frac{f_{тр} \cdot q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2)}{2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S} \cdot 2. \quad (9)$$

У вираженні (9) $q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2)$ є постійним зусиллям притиску – $Q_{пр}$ і формула (9) набере вигляду

$$\sigma_{тр,ф} = \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S}. \quad (10)$$

З отриманої формули (10) витікає, що на граничну деформацію при глибокому витягу впливають і умови тертя, враховані коефіцієнтом тертя $f_{тр}$, викликане силою притиску $Q_{пр}$ між заготівлею, притиском і площиною матриці.

Вище представлені міркування були потрібні для розгляду питання і проведення досліджень впливу зусилля притиску на штампування сталей підвищеної міцності.

Визначення значень усіх доданків, що входять в рівняння (2), не входило в завдання цієї статті.

Проведені дослідження властивостей тонколистової низьколегованої сталі типу 08ГСЮТ (Ф) з метою підвищення її здатності до штампування.

Досліджувалися вплив тиску притиску q на гофроутворювання і величину коефіцієнта граничної деформації $K_{г,д}$ [16], $K_{г,д} = f(q)$, а отже і зусилля притиску $Q_{пр}$, для мало вуглецевих сталей 08Ю, 08кп та низьколегованих типу 08ГСЮТ (Ф).

Декілька слів про коефіцієнт граничної деформації $K_{г,д}$.

Для оцінки штампування пропонується застосовувати відношення D_3 / D_{ϕ}

$$K_{г,д} = D_3 / D_{\phi}, \quad (11)$$

де D_3 – діаметр заготівлі, мм;

D_{ϕ} – середній діаметр фланця,

що утворився в результаті неповного витягу (до розриву) циліндричного стакана.

Випробування для визначення $K_{гд}$ проводяться на тому ж устаткуванні, що і для визначення K по Свифту [11, 13], наприклад на машині фірми «Эриксен» або на витяжній машині іншої конструкції із спеціальним оснащенням що є пресом подвійної дії. Для визначення $K_{гд}$ заготовлі повині бути одного максимального діаметру, що забезпечить руйнування в усіх випадках за наявності фланця (рекомендується $D_3 / d_n \geq 2,3$, де d_n – діаметр пуансона, мм). В результаті вийде порваний стакан з фланцем (рис. 2, 3), вимірявши який отримаємо середній діаметр фланця, D_ϕ , рівний

$$D_\phi = 1/4 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4). \quad (12)$$

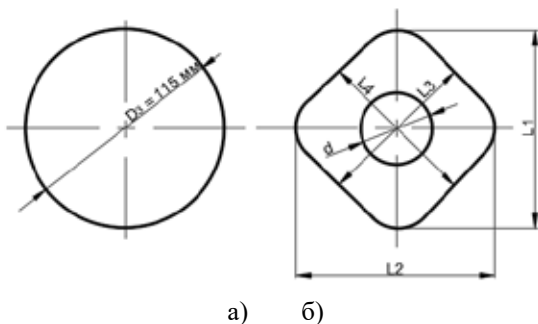


Рис. 2. Заготовля (а) для випробування на машині фірми «Эриксен» 140-12Мр і стакан, що вийшов після випробування, з фланцем (б)



Рис. 3. Зразок після випробування

Знаючи D_3 і D_ϕ , можна за формулою (11) знайти коефіцієнт граничної деформації $K_{гд}$.

Технологічні випробування даних сталей на здатність до штампування проводилися в умовах ЦЗЛ заводу Запоріжсталь на випробувальній машині 140-12Мр. Здійснювався витяг досліджуваних сталей товщиною 0,7 мм в циліндричний стакан пуансоном діаметром 50 мм з плоским дном. Властивості досліджуваних сталей представлена в таблиці 1, де σ_T – межа текучості, МПа; σ_y – тимчасовий опір (межа міцності), МПа; σ_4 – відносне подовження %; R – коефіцієнт нормальної пластичної анізотропії; n – показник зміцнення.

На рисунку 4 штрихуванням показані області можливого штампування. При зменшенні тиску притиску, ліворуч від неї (області можливого

штампування), витяг можливий, але з істотним гофруванням. Вправо від вказаної області подальше збільшення притиску призводить до відсутності ковзання фланця відносно поверхні притиску і обриву донної частини. Отже граничні значення $K_{гд}$, визначені при q_{min} , будуть для сталі 08Ю – 1,086, для сталі 08кп – 1,050, для сталі 08ГСЮТ – 1,056 (рис. 4, табл. 1). Зірочкою на рис. 4 позначені оптимальні значення $K_{гд}$.

Таблиця 1

Властивості тонколистових сталей, використовуваних в експерименті впливу тиску притиску q на коефіцієнт $K_{гд}$

Сталь	σ_T , МПа	σ_y , МПа	σ_4 , %	R	n	$K_{гд}$
08Ю	190	295	37,0	1,54	0,210	1,086
08кп	215	280	29,5	1,12	0,160	1,050
08ГСЮТ	308	430	32,0	1,21	1,176	1,056

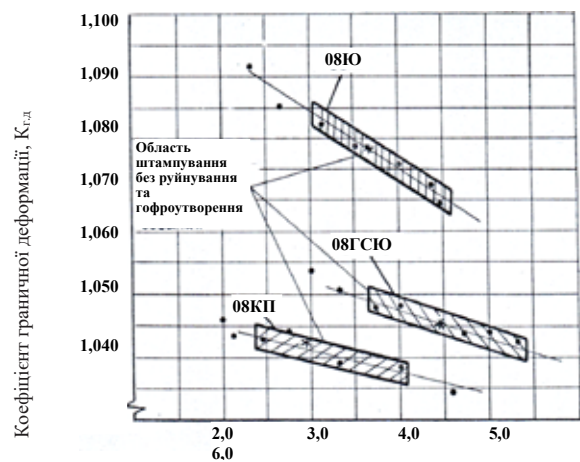


Рис. 4. Залежність коефіцієнта граничної деформації $K_{гд}$ від тиску притиску q для різних сталей

Якщо узяти відношення мінімального тиску притиску на початку процесу до межі текучості відповідної сталі (q_{min} / σ_T) (рис. 4), то отримаємо точки: для сталі 08Ю – 0,016, для сталі 08кп – 0,011, для сталі 08ГСЮТ – 0,012. Таким чином, хоча мінімальне значення тиску в притиску для сталі 08ГСЮТ і є найбільшим, рівним 3,6 МПа, тобто майже рівне q_{min} для сталі 08Ю (приблизно 3,0 МПа), його відносне значення істотно нижче, ніж для сталі 08Ю і лише ненабагато перевищує таке значення для сталі 08кп.

Як впливає з порівняння мінімального відносного тиску у притиску з механічними властивостями металу (q_{min} / σ_T) ця величина щонайближче корелює з показником нормальної пластичної анізотропії і межею текучості. Практичним висновком з отриманих результатів є рекомендація про вибір

при штампуванні мінімального значення тиску притиску. При цьому, слід звернути увагу на те, що його відносне значення (по відношенню до межі текучості сталі) для низьколегованої сталі підвищеної міцності істотно нижче, ніж для сталі 08Ю. Практика штампування тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності з товщиною, зменшеною на 10...15% в порівнянні із сталями типу 08, показує, що іноді абсолютне значення тиску притиску при цьому для низьколегованих сталей навіть дещо нижче, ніж для мало вуглецевих сталей більшої товщини.

Формула, рекомендована В. П. Романовським [10] для розрахунку тиску притиску

$$q = 2 \cdot (D / d - 1,2) \cdot [D / (S \cdot 100)] \quad (13)$$

де D – граничний діаметр заготівлі, мм;
 d – діаметр циліндра, що утворився при витягу, (діаметр пуансона) мм;
 S – товщина заготівлі, мм,

показує для сталі 08Ю дещо завищене, на 20...25% значення мінімально допустимого тиску притиску q в порівнянні з виробничим досвідом. Такий надлишок виправданий при епізодичному налаштуванні пресів і, вказану формулу, можна рекомендувати для застосування при штампуванні сталі 08Ю.

Явище гофроутворення у фланці при штампуванні порівняно явищу втрати подовжньої стійкості високого зразка при стискуванні. При цьому прикладення додаткових сил в площині протилежної до площини листа, перешкоджатиме втраті стійкості. Також, очевидно, на втрату стійкості впливатиме анізотропія властивостей в подовжньому і поперечному напрямках самого зразка. У даному випадку гофроутворення у фланці роль сил, що перешкоджають втраті подовжньої стійкості, виконує тиск притиску. Тому доцільне визначення величини цього зусилля зв'язати з анізотропією властивостей матеріалу, оцінюваної показником анізотропії R . Крім того, абсолютне значення тиску притиску, перешкоджає гофроутворенню, залежить ще і від межі текучості сталі σ_T , оскільки втрата подовжньої стійкості при штампуванні має місце не при пружному, а при пластичному формоутворенні.

З урахуванням отриманих нами експериментальних результатів формула (13) може бути видозмінена в цілях її використання і для інших сталей і набере наступного вигляду

$$q = 2 \cdot (\sigma_T / 190)^{0,9} \cdot (D / d - 1,2) \cdot [D / (S \cdot 100)] \cdot R / 1,54 \quad (14)$$

де σ_T – межа текучості випробовуваної сталі, МПа;
 R – коефіцієнт пластичної анізотропії.

У формулі (14) додатково врахована необхідна зміна тиску притиску q за рахунок зміни межі текучості σ_T і показника анізотропії R .

При підстановці значень σ_T і R для сталі 08Ю з експерименту (табл. 1) формула (14) тотожна якій запропонована Романовським В. П. [10]. На рисунку 1 зірочкою вказані розрахункові значення тиску притиску для сталей 08Ю, 08кп і 08ГСЮТ. Якщо по формулі (14) визначити тиск притиску для сталі 08Ю більшої товщини, яка імовірно застосовувалася до сталі 08ГСЮТ (сталь 08Ю – $S = 0,8$ мм; сталь 08ГСЮТ – $S = 0,7$ мм), то отримаємо значення $q = 3,6$ МПа. Це менше, ніж рекомендоване значення тиску притиску по формулі (14) для сталі 08ГСЮТ меншої товщини ($S = 0,7$ мм), рівне 4,4 МПа. Надлишок тиску притиску для сталі 08ГСЮТ складає більше 18%.

Таким чином, при штампуванні сталі 08ГСЮТ меншої товщини на 10...15% в порівнянні із сталлю 08Ю відповідно до розрахунку тиску притиску необхідно дещо збільшувати. Слід зазначити, що вживані в практиці налаштування пресів при штампуванні тиск притиску істотно перевищені проти необхідних для запобігання гофроутворення.

Був проведений статистичний аналіз результатів експерименту $K_{пл} = f(Q_{пр})$. Нижче представлена обробка результатів вимірів залежності штампування, яка характеризуватиметься коефіцієнтом граничної деформації – $K_{пл}$, і зусиллям притиску – $Q_{пр}$ сталі підвищеної міцності типу 08ГСЮТ, товщиною 0,7...1,2 мм.

При обробці результатів вимірів користувалися наступним порядком операцій:

1. Результати кожного виміру записували в таблицю.

2. Обчислювали середнє значення з n вимірів

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (14)$$

3. Знаходили погрішності окремих вимірів

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i \quad (15)$$

4. Обчислювали квадрати погрішностей окремих вимірів $(\Delta a_i)^2$.

5. Якщо одне або декілька вимірів різко відрізнялися один від одного за своїм значенням від інших вимірів, то перевіряли, чи не є воно промахом.

6. Визначали середню квадратичну погрішність результату серії вимірів

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i)^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

7. Задавалися значенням надійності α .

8. Визначався коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha} \cdot (n)$ для заданої надійності α і числа зроблених вимірів n .

9. Знаходили межі довірчого інтервалу (погрішність результату вимірів)

$$\Delta a = t_{\alpha} \cdot (n) \cdot \Delta S_a. \quad (17)$$

10. Застосували метод найменших квадратів, отримували два рівняння регресії в результаті мінімізації суми квадратів відхилень уздовж однієї осі координат, потім уздовж іншої.

11. Для виміру тісноти зв'язку між шуканими величинами використали коефіцієнт кореляції r , що характеризує, як близько лежать експериментальні точки до лінії регресії.

Проводили обробку вимірів коефіцієнта граничної деформації $K_{г.д}$ для значень надійності $\alpha = 0,95$ і $\alpha = 0,99$. Двадцять значень $K_{г.д}$ приведені в таблиці 2.

Знаходили середнє значення $K_{г.д}$ і межі довірчого інтервалу з цих вимірів. Вибирали довільне число $K_{г.д}^0$, зручне для розрахунків – $K_{г.д}^0 = 1,05$

$$K'_{г.д} = K_{г.д.0} + \sum (K_{г.д.i} - K_{г.д.0}) = 1,0553,$$

$$K'_{г.д} - K_{г.д.0} = 0,0053.$$

$K'_{г.д} = 1,0553$ – середнє значення з вимірених величин.

Середній квадрат погрішності серії з 20 вимірів або, те ж саме, середнє квадратичне відхилення середнього значення з вимірених величин буде рівне

$$\Delta S^2 K'_{г.д} = \left[\sum_{i=1}^n (K_{г.д.i} - K_{г.д.0}) - n(K'_{г.д} - K_{г.д.0})^2 \right] \frac{1}{n(n-1)} = 3,6 \cdot 10^{-6},$$

$$\Delta S^2 K'_{г.д} = 1,897 \cdot 10^{-5}.$$

Для надійності $\alpha = 0,95$ і $n = 20$ з таблиці VII [17] знаходили значення коефіцієнта Стьюдента ($t_{\alpha} = 2,09$) і обчислювали абсолютну погрішність результату вимірів

$$\Delta K_{г.д} = t_{\alpha} \cdot \Delta S K'_{г.д} = 3,965 \cdot 10^{-5}.$$

Результат можна представити у виді

$$(1,0553 - 3,965 \cdot 10^{-5}) \leq K_{г.д} \leq (1,0553 + 3,965 \cdot 10^{-5})$$

або

$$1,05526 \leq K_{г.д} \leq 1,05534.$$

Для надійності $\alpha = 0,99$, $t_{\alpha} = 2,85$

$$\Delta K_{г.д} = 2,85 \cdot 0,1897 \cdot 10^{-4} = 0,54 \cdot 10^{-4}.$$

$$1,0552 \leq K_{г.д} \leq 1,0554.$$

Для надійності $\alpha = 0,99$, $t_{\alpha} = 2,85$

$$\Delta K_{г.д} = 2,85 \cdot 0,1897 \cdot 10^{-4} = 0,54 \cdot 10^{-4}.$$

$$1,0552 \leq K_{г.д} \leq 1,0554.$$

Функціональну залежність між двома величинами – $K_{г.д}$ і $Q_{пр}$ визначали для сталі 08ГСЮТ товщиною 0,7...1,2 мм.

В результаті експерименту отримали ряд значень $K_{г.д}$, що відповідають значенням іншої вели-

Підставляли значення a_0 і a_1 у формулу (18) і отримали

$$K_{г.д} - 1,053 = -9,7 \cdot 10^{-5} + 2,13 \cdot 10^{-3} (Q_{пр} - 14,00).$$

$$K_{г.д} = 1,0827 - 0,00213 \cdot Q_{пр}. \quad (19)$$

Рівняння регресії (19) отримане в результаті мінімізації суми квадратних відхилень уздовж осі $K_{г.д}$.

Аналогічно отримували рівняння регресії в результаті мінімізації суми квадратів відхилень уздовж осі $Q_{пр}$. Вирішували рівняння

$$a_0 N + a_1 \Sigma(K_{г.д} - 1,053) = \Sigma(Q_{пр} - 14,00)$$

$$a_0 \Sigma(K_{г.д} - 1,053) + a'_1 \Sigma(K_{г.д} - 1,053)^2 = \Sigma(K_{г.д} - 1,053) (Q_{пр} - 14,00)$$

знаходили

$$a'_0 = -0,0665 \cdot 10^{-5}; \quad a'_1 = 518,44.$$

Рівняння регресії прикмет вид

$$Q_{пр} = 559,85 - 518,44 \cdot K_{г.д}. \quad (20)$$

Знаходили коефіцієнт парної кореляції, r , за формулою

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i} \cdot Q_{пр.i} - \sum_{i=1}^{20} K_{г.д} \cdot \sum_{i=1}^{20} Q_{пр}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^{20} Q_{пр.i}^2 - (\sum_{i=1}^{20} Q_{пр.i})^2] \cdot [n \sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i}^2 - (\sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i})^2]}}$$

Для цього склали таблицю 3.

Таблиця 3

Експериментальні значення зусилля притиску і коефіцієнта граничної деформації

$Q_{пр}, \text{кН}$	$K_{г.д}$
5,00	1,072
6,50	1,071
8,00	1,068
9,00	1,064
9,50	1,061
10,00	1,058
11,00	1,059
12,00	1,057
12,50	1,056
13,00	1,055
13,50	1,054
14,00	1,053
15,00	1,050
15,50	1,049
16,00	1,048
16,50	1,047
17,00	1,047
17,50	1,046
18,00	1,045
18,50	1,045

чини $Q_{пр}$ (табл. 3). Знаходили функцію $K_{г.д} = f(Q_{пр})$, значення якої при $K_{г.д} = K_{г.д.1} = K_{г.д.2} \dots = K_{г.д.n}$ можливо менше відрізнялися від емпіричних значень $Q_{пр.1}, Q_{пр.2}, \dots, Q_{пр.n}$.

Таблиця 4

Дані для вирішення рівняння (18)

Обробка	вмір	коefficient	деформації	граничної	$(Q_{пр} - 14,00)^2$	$(Q_{пр} - 14,00) \times \times$ $(K_{г.д} - 1,053)$	$(K_{г.д} - 1,053)^2$
	5,00	-9,0	0,019		81,00	-0,171	0,000361
	6,50	-7,5	0,018		56,25	-0,1350	0,000324
1,072	8,00	-6,0	0,015	$(K_{г.д} - K_{г.д.0})^2$	36,00	-0,0900	0,000225
1,071	9,00	-5,0	0,011	$4,84 \cdot 10^{-4}$	25,00	-0,0550	0,000121
1,068	9,50	-4,5	0,008	$4,81 \cdot 10^{-4}$	20,25	-0,0360	0,000064
1,064	10,00	-4,0	0,005	$3,24 \cdot 10^{-4}$	16,00	-0,0200	0,000025
1,061	11,00	-3,0	0,006	$1,96 \cdot 10^{-4}$	9,00	-0,0180	0,000036
1,058	12,00	-2,0	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	4,00	-0,0080	0,000016
1,059	12,50	-1,5	0,003	$0,64 \cdot 10^{-4}$	2,25	-0,0045	0,000009
1,057	13,00	-1,0	0,002	$0,81 \cdot 10^{-4}$	1,00	-0,0020	0,000004
1,056	13,50	-0,5	0,001	$0,49 \cdot 10^{-4}$	0,25	-0,0005	0,000001
1,055	14,00	0	0	$0,36 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
1,054	15,00	1,0	0,003	$0,25 \cdot 10^{-4}$	1,00	-0,0030	0,000009
1,053	15,50	1,5	0,004	$0,16 \cdot 10^{-4}$	2,25	-0,0060	0,000016
1,050	16,00	2,0	0,005	$0,09 \cdot 10^{-4}$	4,00	-0,0100	0,000025
1,049	16,50	2,5	0,006	0	6,25	-0,0150	0,000036
1,048	17,00	3,0	0,007	$0,01 \cdot 10^{-4}$	9,00	-0,0180	0,000036
1,047	17,50	3,5	0,007	$0,04 \cdot 10^{-4}$	12,25	-0,0245	0,000049
1,047	18,00	4,0	0,008	$0,09 \cdot 10^{-4}$	16,00	-0,0320	0,000064
1,046	18,50	4,5	0,008	$0,09 \cdot 10^{-4}$	20,25	-0,0360	0,000064
1,045	При $n = 20$	$\Sigma = -22$	$\Sigma = 0,045$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$\Sigma = 322,00$	$\Sigma = -0,685$	$\Sigma = 0,001485$
1,045		$\Sigma = -22$	$\Sigma = 0,045$	$0,25 \cdot 10^{-4}$			
$\Sigma K_{г.д} = 21,105$	$\Sigma (K_{г.д} - K_{г.д.0}) = 0,105$		$\Sigma (K_{г.д} - K_{г.д.0})^2 = 19,36 \cdot 10^{-4}$				

Криву залежності $K_{г.д} = f(Q_{пр})$, що проходить поблизу експериментальних точок ($K_{г.д} - Q_{пр}$)

Значення зусилля притиску і коефіцієнта граничної деформації для визначення коефіцієнта парної кореляції

$Q_{пр}$	$K_{гд}$	$Q_{пр,i}^2$	$Q_{пр,i} \cdot K_{гд,i}$	$K_{гд,i}^2$
5,00	1,072	25,00	5,3600	1,1492
6,50	1,071	42,25	6,9615	1,1470
8,00	1,068	64,00	8,5440	1,1406
9,00	1,064	81,00	9,5760	1,1321
9,50	1,061	90,25	10,0795	1,1257
10,00	1,058	100,00	10,5800	1,1194
11,00	1,059	121,00	11,6490	1,1215
12,00	1,057	144,00	12,6840	1,1172
12,50	1,056	156,00	13,2000	1,1151
13,00	1,055	169,00	13,7150	1,1130
13,50	1,054	182,25	14,2290	1,1109
14,00	1,053	196,00	14,7420	1,1088
15,00	1,050	225,00	15,7500	1,1025
15,50	1,049	240,25	16,2595	1,1004
16,00	1,048	256,00	16,7680	1,0983
16,50	1,047	272,25	17,2755	1,0962
17,00	1,047	289,00	17,7990	1,0962
17,50	1,046	306,25	18,3050	1,0941
18,00	1,045	324,00	18,8100	1,0920
18,50	1,045	342,24	19,3325	1,0920
$\Sigma 258$	$\Sigma 21,105$	$\Sigma 3625,25$	$\Sigma 271,6195$	$\Sigma 22,2722$

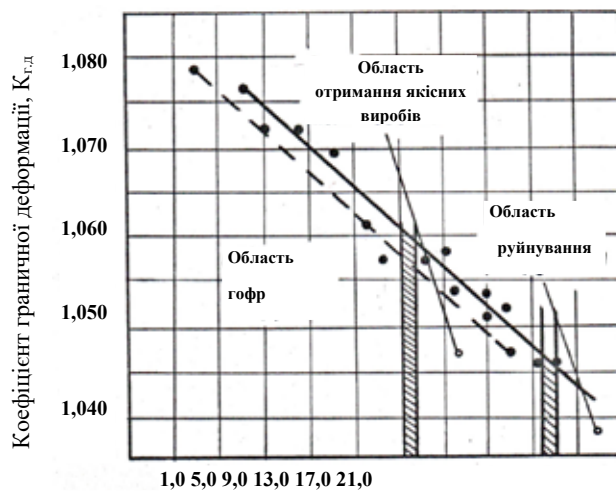


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом граничної деформації ($K_{гд}$) і зусиллям притиску ($Q_{пр}$)

Підставляючи данні таблиці 5 у вище приведену формулу, отримали коефіцієнт парної кореляції $r = -0,97$.

Отримане значення коефіцієнта парної кореляції $r = -0,97$ говорить про лінійну функціональну залежність між величинами $K_{гд}$ і $Q_{пр}$ (рис. 5).

Його негативне значення показує, що зв'язок між змінними негативний, тобто з ростом значень $Q_{пр}$ величина $K_{гд}$ зменшується.

Висновки. На підставі дослідження заготовок з маловуглецевих 08Ю, 08кп та низьколегованих типу 08ГСЮТ(Ф) сталей було встановлено:

- вплив тиску притиску q та зусилля притиску $Q_{пр}$ на гофроутворення та величину коефіцієнта граничної деформації $K_{гд}$;

- лінійна функціональна залежність між величинами коефіцієнтом граничної деформації $K_{гд}$ та зусиллям притиску $Q_{пр}$;

- напруга тертя у фланці під час операції штампування-витяжки склала приблизно 15% у загальній напрузі $\sigma_{заг}$;

- тиск притиску необхідно дещо збільшувати при штампуванні сталі 08ГСЮТ меншої товщини на 10 ... 15% в порівнянні зі сталлю 08Ю.

Запропонований метод аналізу напружено-деформованого стану матеріалу при різних значеннях зусилля притиску під час процесу штампування листової сталі дозволяє досягти необхідного рівня штампування листових сталей підвищеної міцності.

Список літератури:

1. Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В. Сучасні тенденції застосування сталей підвищеної міцності в автомобілебудуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: технічні науки*, 2022. Том 33 (72) № 1. С. 12–18.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Ленинград, 1980. 432 с.
3. Катаков М.П. Расчёт усилия прижима, предотвращающего складкообразование при вытяжке круглых изделий. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1973. № 12. С. 24-26.
4. Аргат Р.Г., Пузырь Р. Г., Долгих О.Н. Увеличение степени деформации при вытяжке цилиндрических деталей без прижима фланца. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 22–24 листопада 2017 р.)*. НТУ «ХПІ», 2017. С. 17.
5. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії»*. 2017. № 36 (1258). С. 5–9.
6. Феофанова А.Е. Экспериментальные исследования предельного формоизменения при листовой штамповке. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004. № 6. С. 19-22.
7. Аверкиев А.Ю. Предельное формоизменение при штамповке листового металла. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1995. № 10. С. 17-20.
8. В. Д. Обдул, В. В. Широкобоков, А. Ю. Матюхін. Диференційоване притискування фланцю заготовки під час витягування. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, 2018, № 41(1317). С. 36-38.
9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград, 1979. 520 с.
10. Ковка и штамповка. Листовая штамповка: в 4 т. / под ред. А.Д. Матвеева. Москва. 1985-1987. Т.4. 544 с.
11. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Москва, 1977. 280 с.
12. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М Москва, 1985. 76 с.
13. Белосевич В.К. Анализ условий трения и напряжений трения при листовой штамповке-вытяжки со смазкой. Трение и износ / В.К. Белосевич, В.Б. Рудасёв, Л.А. Апостолов. 1989. Т. 10. № 5. С. 879-885.
14. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. Москва, 1978. 360 с.
15. В.Б. Рудасёв, В.К. Белосевич, Л.А. Апостолов, И.А. Бухбиндер Новый способ определения штампуемости листовых материалов. *Известия вузов. Серия: Чёрная металлургия*, 1983, № 9. С. 76-79.
16. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. Москва, 1970. 104 с.

Rudasov V.B., Yakubovskiy O.M., Holovina O.V. THE HOLDDOWN PRESSURE IN THE PROCESS OF SHEET-METAL STAMPING OF HIGH-STRENGTH STEELS

This paper considers technological measures not related to changes in the shape of the workpiece and the tool, aimed at improving the compressibility of high-strength steels used for the manufacture of body parts for cars. The paper proposes to analyze the stress and strain state of the workpiece when changing the holddown pressure during the process of sheet-metal stamping. The studies were carried out with workpieces made of low-carbon steels (08Ю, 08кп) (08Yu, 08kp) and low-alloy steels of 08ГСЮТ(Ф) (08GSYuT(F) type. The boundary values of the coefficient of limiting deformation have been determined for each workpiece.

The results of the experiment were processed using a secondary method of mathematical-statistical analysis (correlation analysis), in which the compressibility of high-strength steel, characterized by the coefficient of limiting deformation and holddown pressure, was determined. For this purpose, the relationships between the coefficient of limiting deformation and the holddown pressure, between the coefficient of limiting deformation and the down pressure were determined for different steels when processing the measurement results.

On the basis of the received dependences, the influence of the down pressure on the buffing and the value of the coefficient of limiting deformation were analyzed, and the area of possible stamping was established, that is, the area of values of the down pressure, where the stamping process of workpieces of various steels will take place without buffing and destruction.

A practical conclusion from the obtained dependence between the coefficient of limiting deformation and the down pressure is the recommendation to select the minimum value of the down pressure when stamping. The dependence between the coefficient of limiting deformation and the holddown pressure made it possible to establish the boundary values of the holddown pressure of the workpiece in the process of sheet-metal stamping for three areas: the area of quality products, the area of buffing, and the area of destruction.

Key words: High Strength Steels, automobile industry, the stress and strain state, stamping processing, the holddown pressure.