

Рудасьов В.Б.

Дніпровський державний технічний університет

Головіна О.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Якубовський О.М.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

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

Москаленко Г.В.

ВСП «Технологічний фаховий коледж» Дніпровського державного технічного університету

АНАЛІЗ УМОВ І НАПРУГИ ТЕРТЯ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

У статті розглянуті технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготівлі і інструменту, спрямовані на підвищення штампування сталей підвищеної міцності, використовуваних для виготовлення кузовних деталей автомобілів. У роботі запропоновано аналізувати напружено-деформований стан заготівлі, при зміні умов тертя використовуючи технологічні мастильні матеріали під час самого процесу листового штампування. В якості мастильних матеріалів досліджувались мінеральні олії (трансформаторна і індустріальна олії), жири, а саме, бавовняна і пальмова олії, та сухі мастильні матеріали, такі як графіт, дисульфід молібдену. У статті розглянута складова формули визначення загальної напруги втягування заготівлі у матрицю, а саме формула напруги, яка викликана тертям між заготівлею, притиском і матрицею на плоскій його частині. Встановлено, що при операції штампування-втягу умови тертя у фланці заготівлі, між притиском і матрицею і на закругленій матриці не ідентичні і не можуть бути описані однією функцією. Тому, в теорію визначення граничного коефіцієнта втягу тонколистового прокату для оцінки умов тертя на згині матриці введена величина напруги тертя на закругленій матриці – $\tau_{пр.м.}$, яка дозволяє отримати точніший розрахунок характеристики штампування. При проведенні експериментів був вибраний метод виміру сил тертя, заснований на принципі захоплення нерухомого зразка рухливим інструментом з силою, пропорційній величині сили тертя. За допомогою інтервальної оцінки статистичних параметрів експерименту були проведені дослідження взаємозв'язку напруги тертя і тиску в області відносно низьких навантажень, характерних для штампування із застосуванням технологічних мастильних матеріалів. За результатами дослідження запропоновано при штампуванні звичайних сталей і сталей підвищеної міцності використовувати дві характеристики тертя, а саме, в притиску при малих тисках – коефіцієнт тертя і на згині матриці при великих тисках – напругу тертя.

Ключові слова: листові сталі підвищеної міцності, напружено-деформований стан, напруга тертя, сили тертя, технологічні мастила для штампування.

Постановка проблеми. Вдосконалення технологічних процесів металообробки та виготовлення кузовних деталей автомобілів несе в собі ряд вагомих переваг і віддзеркалює загальні тенденції у розвитку автомобільної індустрії. Поліпшення цих технологій має потенціал підвищити конкурентоспроможність галузі, зменшити негативний вплив на довкілля та сприяти створенню безпечніших транспортних засобів.

У проведеному дослідженні [1, 2] виявлено, що використання сталей підвищеної міцності (СПМ) може вирішувати проблеми, пов'язані з безпекою, екологічністю та матеріаломісткістю у виробництві автомобілів. Однак у роботі акцентується, що, незважаючи на ці переваги, виробництво кузовних деталей автомобілів штампуванням представляє викликаюче завдання через труднощі об'єднання високої пластичності сталі з підвищеною міцністю. Ця складність виникає через тех-

нічні обмеження та труднощі в процесі обробки матеріалів. Таким чином, штампуванням важко досягти оптимального балансу цих двох властивостей, оскільки підвищення міцності часто призводить до зниження пластичності, і навпаки.

Цей виклик визначає необхідність подальших досліджень та розробки нових технологічних рішень з метою знаходження балансу між високою міцністю та пластичністю сталі при виробництві кузовних деталей автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка штампування є важливою для визначення ефективності процесу листового штампування. Використання експериментальних та теоретичних методів дозволяє провести комплексну оцінку якості процесу та властивостей матеріалу. Зокрема, це допомагає ідентифікувати ключові фактори, які впливають на кінцевий результат, та розробляти стратегії для покращення ефективності виробництва та уникнення негативних наслідків локальних деформацій.

Важливим кроком у виробничому процесі листового штампування є вибір належного мастильного матеріалу. У дослідженні [1, 2] автори представили практичну методологію, використовуючи тестування глибокого витягу та аналіз кінцевих елементів для оцінки мастил для штампування в умовах, що найбільше наближені до виробничих. В ході цього дослідження було оцінено п'ять різновидів мастил для штампування, і виявлено, що застосування методів тестування глибокого витягу та аналізу кінцевих елементів надає можливість систематично оцінювати ефективність різних мастильних матеріалів.

У зв'язку з ключовими аспектами охорони здоров'я та екології зосереджуються значні зусилля на розробці та впровадженні виробничих змащувальних матеріалів, які отримують з природних ресурсів та не базуються на сировині нафтового походження. У роботі [3] представлено аналіз нового екологічно чистого змащувального матеріалу з метою визначення його потенціалу для використання в процесах штампування листового металу. Змащувальна речовина, що складається з масла канолі, змішаного з кристалами борної кислоти (5 мас.% з середнім розміром часток 100 мкм), істотно випередила інші змащувальні матеріали. Вона має природний та екологічно чистий склад.

У дослідженні [4] були оцінені трибологічні характеристики чотирьох базових мастил із різною хімічною структурою (парафінові і нафтові) та в'язкістю (2 і 20 сСт), а також води, щодо

їхнього використання при штампуванні сталевих листів. Отримані результати були порівняні з незмащеним контактом, що дозволило визначити оптимальні властивості для забезпечення ефективного процесу штампування.

У зв'язку із розширенням технічних можливостей, наукові дослідження в області листового штампування все більше зосереджуються на вдосконаленні технологічних процесів та покращенні властивостей використовуваних матеріалів, включаючи мастила. Різноманітність виробничих умов, зокрема перехід до штампування листових конструкцій із спеціальних металів, підкреслює необхідність уточнення застосування фізичних моделей процесів штампування-витягу із технічними мастилами, а також комплексного вивчення силових процесів деформації та врахування багатьох техніко-економічних показників.

Метою статті є розробка комплексу заходів з метою підвищення здатності сталей підвищеної міцності до штампування кузовних деталей автомобілів шляхом вибору складів технологічних мастильних матеріалів з подальшим аналізом напружено-деформованого стану заготовки.

Виклад основного матеріалу. Взаємодію пари (метал, що деформується, і інструмент), що третється, оцінюють найчастіше коефіцієнтом тертя ($f_{тр}$), що є функцією напруги тертя ($\tau_{тр}$) і тиску (q) – закон Амонтона:

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot q. \quad (1)$$

Якщо зусилля, прагнуче викликати зміну форми кристалічного тіла, досягає критичного значення, то пластична деформація, що розвивається, супроводжується утворенням площин ковзання. Ковзання в кристалічній решітці твердого тіла по своєму механізму аналогічно ковзанню в граничному шарі при зовнішньому терті. В даному випадку правильніший двочленний закон тертя по Б.В. Дерягину:

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot (q_0 + q) = \tau_0 + f_{тр} \cdot q, \quad (2)$$

де другий член відбиває вплив нормального тиску на міцність зв'язків в псевдо кристалічній решітці граничного шару.

У формулі (2) τ_0 відбиває адгезійну (зчеплення поверхонь різнорідних твердих і/або рідких тіл) складову напруги тертя, яка не залежить від нормального тиску; p_0 – умовне значення нормального тиску, що відповідає йому.

Використання двочленного закону приведе до ускладнення в розрахунках, тому, залежно від значень величин τ_0 і $f_{тр}$ в практичному діапазоні умов, можна використати перший, або другий член рів-

няння (2), тобто закон постійності напруги тертя або закон Амонтона.

У цій роботі виходили з того, що напруга, пов'язана з умовами тертя на закругленні матриці порівняно з тертям у фланці, різна за величиною тиску у декілька разів, що зумовлює можливість їх опису різними функціями.

У основі машини тертя що імітує контактне тертя при штампуванні-витягу, був вибраний метод виміру сил тертя, заснований на принципі захоплення нерухомого зразка рухливим інструментом з силою, пропорційній величині сили тертя із застосуванням в якості вимірників динамометрів різних конструкцій. За величиною деформацій пружного елемента судили про силу або момент тертя. В якості імітуючої машини тертя була застосована пластинчата машина тертя. Схема вузла тертя експериментального пристрою представлена на рис. 1. Він складається з рухливої пластини 1 шириною 30 мм, виконаною з конструкційної сталі У10 твердістю HRC ≥ 50 , чистотою поверхні Ra $\leq 0,32$. Пластина 1 є у контакті із зразками 2, наклеєними на бурти державок 3, вставлених в пази нерухомих пластин 4 за допомогою направляючих типу «ластівчин хвіст». Зразки 2 виготовлялися з маловуглецевої сталі типу 08 завтовшки 1,2 мм.

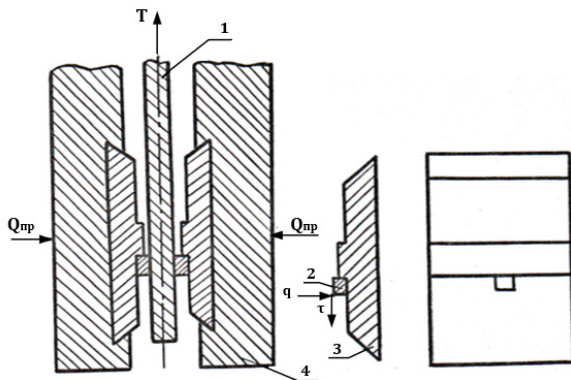


Рис. 1. Вузол тертя пластинчастої машини тертя
1 – рухлива пластина; 2 – зразки; 3 – державки;
4 – нерухомі пластини

Після наклейки зразків на державки поверхня їх знежирювалася ацетоном, і наносився шар випробовуваного мастила. Встановивши державки із зразками в нерухомі пластини, останні стискали з різними зусиллями притиску $Q_{пр}$ або тиском $p = Q_{пр} / F$, де F – площа контактної поверхні зразка 2, після чого відбувалося простягання рухливої пластини 1. Для того, щоб площа F була постійною і не залежала від тиску в цих дослідах, усі зразки перед випробуванням заздалегідь обтискалися із зусиллям $Q_{пр} = 7,0$ кН, після чого

для кожного зразка визначалася площа F . Шлях, пройдений пластиною 1, складав 45...60 мм, виміри проводилися на 15...30 мм шляху. Швидкість ковзання була рівною 10 м/с. При цьому рухлива пластина 1 з наклеєними на неї тензодатчиками опору під впливом виникаючого тертя розтягувалася більшою чи меншою мірою. Зусилля притиску фіксувалося також за допомогою оттарированих тензодатчиків опору.

Після визначення по осцилограмі сили тертя ($P_{тр}$) розраховували значення напруги тертя $\tau_{тр} = P_{тр} / 2F$, де $2F$ – площа контактної поверхні двох зразків 2, так як рухлива пластина 1 є у контакті з поверхнею двох зразків.

На рис. 2 представлені залежності напруги тертя від тиску в широкому діапазоні.

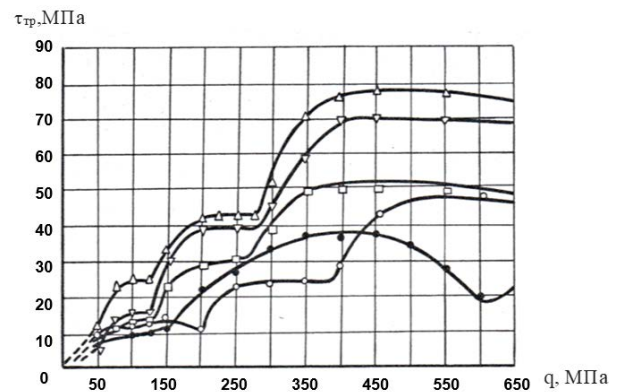


Рис. 2. Залежність напруги тертя від тиску для різних мастильних матеріалів в області високих тисків
△ – трансформаторна олія; ▽ – И-50А;
□ – вазор; ○ – пальмова олія; ● – графіт

Як видно з рис. 2, до певної величини тиску виконується закон Амонтона (1). У міру росту тиску величина напруги тертя перестає зростати, а потім можливо навіть її зниження. Для мастил на вуглеводневій основі зважаючи на поліморфізм (клітини мають різну форму, структуру і розмір) утворюваних ними кристалічних агрегатів і граничної плівки має місце три ділянки, на яких послідовно спостерігається постійність коефіцієнта тертя, а потім постійність напруги тертя. Якщо нехтувати цим поліморфізмом, то аж до 350...450 МПа можна умовно прийняти справедливості закону Амонтона, а при великих тисках – справедливості закону постійності напруги тертя. В умовах листового штампування величина тиску коливається в межах від 1 до 100...150 МПа. Цей діапазон досліджений недостатній. З приведених даних (рис. 2) виходить, що, строго кажучи, не можна припускати лінійне зростання напруги тертя з ростом тиску вже при тисках вище 50 МПа.

У зв'язку з цим були проведені дослідження взаємозв'язку напруги тертя і тиску в області відносно низьких навантажень, характерних для штампування. Для дослідження були вибрані три групи мастильних матеріалів, які застосовуються при штампуванні. До першої групи віднесені мінеральні олії різної в'язкості (рис. 3): трансформаторне, індустріальне 50 і циліндрове 52.

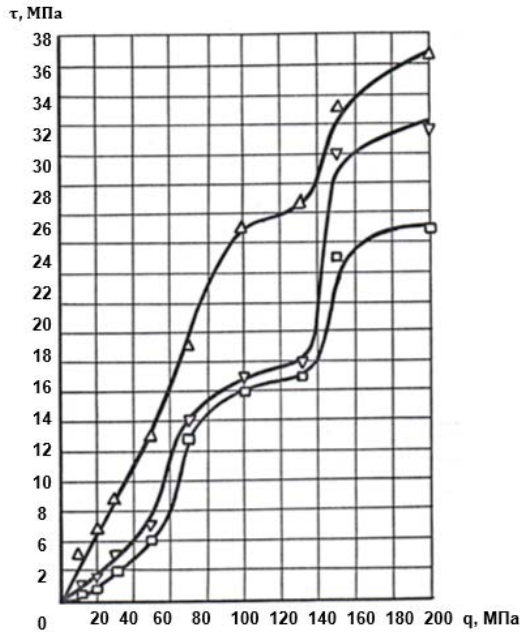


Рис. 3. Залежність напруги тертя від тиску для мінеральних олій в області низьких тисків
 △ – трансформаторна олія; ▽ – I-50A;
 □ – циліндрове 52

У другу групу віднесені жири – пальмові і бавовняні (рис. 4).

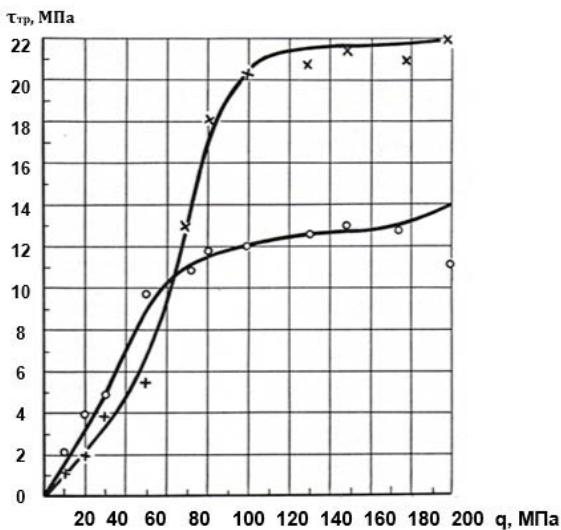


Рис. 4. Залежність напруги тертя від тиску для жирів в області низьких тисків
 + – бавовняна олія; ○ – пальмова олія

У третю групу – сухі мастила – графіт і дисульфід молібдену (рис. 5). Слід звернути увагу на те, що в нашому випадку застосовувалися сухі мастила в чистому вигляді. На практиці вони використовуються в суміші з оліями, що дозволяє отримати напругу тертя не вище, ніж з відповідною олією, а у більшості випадків істотно вище.

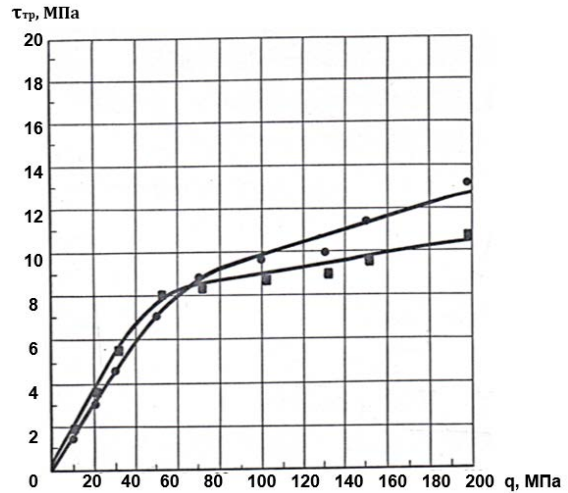


Рис. 5. Залежність напруги тертя від тиску для сухих мастил в області низьких тисків
 ■ – дисульфід молібдену; ● – графіт

З рисунків 3...5 витікає, що при тисках до 40...50 МПа досить точно виконується закон Амонтона. Таким чином, для опису умов тертя в притиску слід застосовувати закон Амонтона. При великих тисках очевидно, що він не виконується. У одних випадках має місце різке підвищення коефіцієнта тертя з ростом тиску і інтенсивний ріст напруги, а потім припинення цього росту і виникнення «майданчика», що характеризує незалежність напруги тертя від тиску. У інших випадках без зміни інтенсивності росту напруги, тобто при $f_{тр} = const$, починаючи з певного тиску, напруга тертя перестає змінюватися. З'являється сходинка. Потім характер ходу кривої повторюється, як це видно з рис. 2. Другий підйом напруги тертя відноситься до області тисків вище 150 МПа і не представляє інтересу для дослідження холодного листового штампування.

При дослідженні мінеральних мастил, так само при тисках вище 50 МПа, закон Амонтона не виконується, хоча і не була зафіксована ділянка постійності напруги тертя з ростом тиску.

Загальний характер залежності напруги тертя від тиску для графіту порівнянний із залежністю, отриманою при мастилі пальмовою олією.

Передбачалося, що тертя в процесі витягу склянки з листового матеріалу змішане. У тому

числі сухе тертя підкоряється закону Амонтона (1). Рідинне – закону Ньютона [10] $\tau_{тр} = z \cdot \text{ск} \cdot v/h$, де z – в'язкість, ск – поверхня ковзання, v – відносна швидкість ковзання, h – товщина шару мастила. Граничне тертя підкоряється своїм специфічним законам. Найбільш правильний опис процесу тертя дається двочленним законом тертя по Дерягину Б.В (2). Складання усіх цих закономірностей дає абсолютно невизначене вираження з багатьма невідомими. Крім того ми не знаємо пайової участі усіх видів тертя в процесі. Це є самостійним і дуже складним завданням, рішення якого нами не передбачалося.

Таким чином, при аналізі умов листового штампування при будь-яких вживаних мастилах в умовах тисків до 50 МПа слідє для розрахунку напруги тертя користуватися законом Амонтона. При великих тисках закон Амонтона не застосовний і для опису величини напруги тертя придатний або закон незалежності напруги тертя від тиску, або складніші залежності. Виходячи з цього результату, пропонується в розрахункових формулах при описі зони притиску користуватися законом Амонтона, що і має місце нині на практиці [11...13].

У літературі [11, 13, 14] вплив тертя на закругленій кромці матриці (рис. 6) на величину напруги тертя приблизно враховували на підставі рівняння Ейлера при ковзанні ремня по шківу [15]. В якості характеристики тертя пропонували використати значення коефіцієнта тертя $f_{тр}$.

При описі зони згину матриці, в якій тиск перевищує 50 МПа, авторами запропоновано користуватися значенням напруги тертя ($\tau_{тр,м}$), характерним для цього тиску:

$$\tau_{тр} = \tau_{тр,м} = T_{тр} / F_{ск} \quad (3)$$

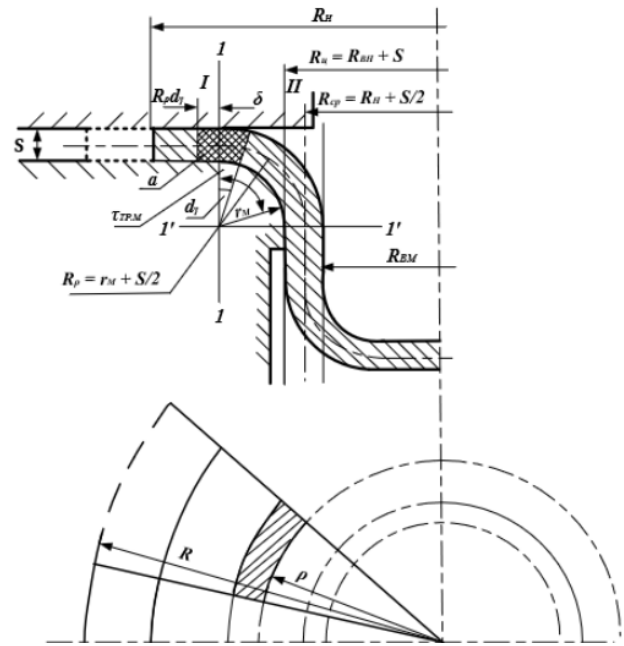


Рис. 6. Схема штампування-витягу циліндричної скляночки для аналізу діючих сил і напруги

Облік впливу тертя на закругленій кромці матриці постійною величиною напруги тертя при зрушенні [16] дозволив уточнити аналіз процесу витягу, отримати точнішу оцінку штампування, про що буде представлено нижче.

У таблиці 1 приведені значення величини $f_{тр}$ і $\tau_{тр}$, отримані експериментальним шляхом на пластинчатій машині тертя.

Розрахунок тисків з урахуванням вимірів максимального зусилля витягу і зусилля притиску з використанням веретенної олії в момент, передуючий руйнуванню, представлений в таблиці 2.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта тертя та напруги тертя у функції тиску для різних мастил

Мастило	Коефіцієнт тертя, $f_{тр}$ при $q < 40$	Напруга тертя, t			Інтервал тисків, що відповідає постійності напруги тертя, МПа	Середня величина напруги тертя на «майданчиках» графіків, МПа
		Q=40...80 МПа	Q=80...120 МПа	Q=120...160 МПа		
Трансформаторна олія	0,235	8,5...22,5	22,5...25,5	25,5...34,0	95...130	25,0
Індустріальне 50	0,050	3,9...13,5	13,5...15,7	15,7...30,7	100...125	15,5
Циліндрове 52	0,050	2,6...12,4	12,4...14,6	14,6...24,5	105...130	14,5
Пальмова олія	0,160	7,0...11,5	11,5...12,4	12,4...12,6	90...170	12,5
Бавовняна олія	0,100	4,4...16,5	16,5...21,0	21,0	110...180	21,0
Графіт	0,075	5,7...8,5	8,5...9,0	9,0...11,5	Плавний купол	9,5
Дисульфід молібдену	0,090	6,7...8,5	8,5...9,1	9,1...9,5	Плавний купол	9,0

**Тиск в притиску і на згині матриці в момент, передуючий руйнуванню,
для заготовель з різних сталей товщиною 0,8 мм при витягу скляночки діаметром 50 мм**

Марка сталі	Тиск в притиску $q_{пр}$, МПа	Тиск на згині матриці, q_m , МПа	Зусилля витягу при штампуванні, $P_{вит.}$, КН	Зусилля притиску, $Q_{пр.}$, КН
08кп	1,56	86,5	49,8	10,5
08Ю	2,00	94,0	53,5	13,4
08ГСЮТ	1,92	127	73,5	12,8

При штампуванні тонколистового металу з маловуглецевих сталей 08кп і 08Ю зусилля витягу скляночки ($P_{вит.}$) діаметром 50 мм в окремих випадках досягає 55 кН. При цьому тиск на радіусі матриці складає близько 95 МПа, і закон тертя Амонтона не виконуватиметься. При штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності (тонколистовий прокат типу 08ГСЮТ, 03ХГЮ, вживаний для штампованих деталей автомобілів, зі зменшеною товщиною на 10...15% в порівнянні з маловуглецевими) зусилля витягу в тих же умовах в 1,4...1,7 разу вище, тобто знаходяться в діапазоні 55...80 кН. При цьому тиск на радіусі матриці буде більше 100 МПа і умови тертя також не підкоряються закону Амонтона. Значення напруги тертя може бути визначене з рис. 3...5 для відповідних мастильних матеріалів.

Для серії експериментів, приведених в таблиці 2, в усіх випадках необхідно використати дві характеристики тертя ($f_{тр}$ і $\tau_{тр}$). Проте досвід показує, що у більшості випадків для маловуглецевих сталей тиск на згині матриці все ж менше 50 МПа, що дозволяє вважати прийнятним використання усіх раніше відомих розрахунків і теоретичних положень штампування-витягу, заснованих на ухваленні закону Амонтона. Для СПМ це, очевидно непринятно. У загальному випадку правильніше користуватися двома характеристиками тертя, а якщо в усіх зонах виконуватиметься закон Амонтона, то підстановкою того, що відповідає тиску значення $\tau_{тр}$ для притиску, не змінимо кінцевого результату.

Найбільш строгим випадком є пальмова олія. При тисках до 50 МПа виконується закон Амонтона (рис. 4), а в широкому діапазоні тисків від 50 до 170 МПа напругу тертя можна вважати постійною. Це дозволяє характеризувати умови тертя в двох діапазонах тисків двома різними характеристиками. Для інших мастильних матеріалів при тисках вище 50 МПа також не можна використати закон Амонтона. Величину напруги тертя навіть за відсутності «майданчика» плинності можна прийняти

або рівною напрузі на ній, або іншому середньому значенню, найближче відповідному фактичному також середньому значенню.

У роботі [2] розглядалася формула визначення загальної напруги втягування заготовки у матрицю:

$$\sigma_{заг} = \sigma_p + \sigma_{зг} + \sigma_{тр.ф} + \sigma_{тр.м}. \quad (4)$$

Було розглянуто питання і отримана формула напруги, яка викликана тертям між заготовлею, притиском і матрицею на плоскій його частині, тобто $\sigma_{тр.ф}$. Розглянемо наступну складову формули (4) $\sigma_{тр.м}$ – напруге тертя на закругленні матриці.

Напруга тертя в небезпечному перетині 1'-1' (рис. 6), тобто напруга, викликана тертям заготовки на закругленні матриці, визначається як:

$$\sigma_{тр.м} = \frac{T_{тр.закр.м}}{F_{1'-1'}}, \quad (5)$$

де $T_{тр.закр.м}$ – сила тертя на закругленні матриці, Н;
 $F_{1'-1'}$ – площа заготовки в перетині 1'-1', м².

Площа заготовки в перетині 1'-1' рівна:

$$F_{1'-1'} = 2 \cdot \pi \cdot R_{вн} \cdot s, \quad (6)$$

де s – товщина металу заготовки, м.

Сила тертя на закругленні матриці:

$$T_{тр.закр.м} = \tau_{тр.м} \cdot F_{тр.закр} \quad (7)$$

Площа, що треться, на закругленні $F_{тр.закр}$ визначатиметься завдовжки дуги кола на закругленні $\frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m$, помноженою на довжину усього кола зігнутої поверхні по матриці $2 \cdot \pi \cdot R_{вн}$ (рис. 6). Тоді:

$$F_{тр.закр} = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{вн} = \pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн},$$

$$T_{тр.закр.м} = \tau_{тр.м} \cdot \pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн}. \quad (8)$$

Підставляючи формули (6) і (8) у вираження (5), отримаємо:

$$\sigma_{тр.м} = \tau_{тр.м} \frac{\pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн}}{2 \cdot \pi \cdot R_{вн} \cdot s} = \tau_{тр.м} \frac{\pi \cdot r_m}{2 \cdot s}. \quad (9)$$

З отриманої формули виходить, що на граничну деформацію при глибокому витягу впливає дія умов тертя на згині матриці, яке не підкоряється закону Амонтона і не може бути розрахована коректно, використовуючи коефіцієнт тертя $f_{тр}$. Пропонується для визначення граничної деформації на згині матриці використати в розрахунках

значення напруги тертя $\tau_{тр}$, про що було обґрунтовано вище.

Таким чином, на здатність матеріалу до витягу впливають у тому числі сумарна дія умов тертя, що виникають в двох різних режимах враховані коефіцієнтом тертя $f_{тр}$, викликане зусиллям притиску $Q_{пр}$ між заготівлею, притиском і площиною матриці [2] і напругою тертя $\tau_{тр}$ на згині матриці.

Була проведена інтервальна оцінка статистичних параметрів експерименту за визначенням залежності напруги тертя від тиску. Розглядався довірчий інтервал – це приблизний діапазон значень, який з високою мірою вірогідності включає усі ці результати [17, 18].

Сенс обчислення довірчого інтервалу полягає в побудові за даними вибірки такого інтервалу, щоб можна було стверджувати із заданою вірогідністю, що значення оцінюваного параметра знаходиться в цьому інтервалі.

Чим ширше довірчий інтервал для заданого рівня вірогідності (скажімо, 95%), тим нижче рівень «довіри» до вибірових оцінок, і навпаки. Широкий довірчий інтервал для вибірового середнього вказує на неточне відображення середній по сукупності. Звідси, чим вузьчий довірчий інтервал, тим краще.

При обробці результатів вимірів користувалися наступним порядком операцій:

1. Використовуване технологічне мастило – трансформаторна олія.
2. Тиск (машина тертя, вузол рис. 1) – 10 МПа.
3. Напряга тертя мінялася при кожному експерименті і заносилася в таблицю 3.

Таблиця 3

Напряга тертя при кожному експерименті

№ експ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Напр.тер., τ	2,8	2,9	2,7	3,0	3,1	2,9	2,7	2,6	3,0	3,0	3,3	2,9	2,9	2,9	2,9

4. Варіаційний ряд цієї вибірки склали: 2,6; 2,7; 2,7; 2,8; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 3,0; 3,0; 3,0; 3,1; 3,3.

5. Розмах вибірки склав $\omega = 3,3 \dots 2,6 = 0,7$.

6. Статистичний ряд вибірки заносили в таблицю 4.

Таблиця 4

Статистичний ряд вибірки експерименту

x_i	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3
n_i	1	2	1	6	3	1	1

де x_i – результат експерименту,

n_i – частота цього результату.

7. Визначали вибірове середнє.
8. Визначали оцінку дисперсії.
9. Розраховували середнє квадратичне відхилення.
10. Розраховували відхилення середнього значення
11. Розраховували коефіцієнт варіації.

Довірчий інтервал для параметра x за результатами n спостережень, коли довірча вірогідність дорівнює $1 - \alpha$ (зазвичай 0,90 або 0,95 або 0,99) і в припущенні, що вибірка вимірів отримана з нормально розподіленої генеральної сукупності, знаходили за формулою:

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot U_{1-\alpha/2} < x < \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot U_{1-\alpha/2} \quad (10)$$

Подальший статистичний аналіз для тисків 20, 30, ..., МПа і так далі зведемо в таблицю 5 для мас-

Таблиця 5

Статистичний аналіз залежності напруги тертя від тиску для різних мастил

Тиск, q, МПа	Розмах вибірки, w	Середнє значення напруги, \bar{x} , МПа	Дисперсія, S^2	Середнє квадратичне відхилення, S	Коефіцієнт варіації, V, %	Довірчий інтервал (довірча вероятністьравна 0,95), МПа	Ширина довірчого інтервалу, МПа
Трансформаторна олія							
10	0,7	2,9	0,07	0,26	8,9	2,76...3,04	0,28
20	0,4	4,8	0,025	0,16	3,3	4,71...4,89	0,18
30	0,4	6,4	0,019	0,14	2,2	6,33...6,47	0,14
50	0,3	11,0	0,016	0,13	1,2	10,93...11,07	0,14
70	0,4	17,1	0,016	0,13	0,7	17,03...17,17	0,14
100	0,5	25,0	0,04	0,2	0,8	24,93...25,07	0,14
130	0,3	26,5	0,004	0,065	0,2	26,46...26,54	0,08
150	0,4	33,0	0,008	0,09	0,2	32,95...33,05	0,1
Індустріальне 50							
10	0,6	0,9	0,103	0,32	35,5	0,72...1,08	0,36
20	0,5	1,5	0,072	0,27	18,0	1,35...1,65	0,30
30	0,6	3,1	0,070	0,26	8,4	3,95...3,25	0,30

Тиск, q, МПа	Розмах вибірки, w	Середнє значення напруги, \bar{x} , МПа	Дисперсія, S^2	Середнє квадратичне відхилення, S	Коефіцієнт варіації, V, %	Довірчий інтервал (довірча вероятність $\gamma=0,95$), МПа	Ширина довірчого інтервалу, МПа
50	0,4	5,1	0,021	0,14	2,7	5,02...5,18	0,16
70	0,4	12,0	0,027	0,16	1,3	11,91...12,09	0,18
100	0,5	15,3	0,021	0,14	0,9	15,22...15,38	0,16
130	0,4	16,1	0,021	0,14	0,9	16,02...16,18	0,16
150	0,4	30,0	0,017	0,13	0,4	29,93...30,07	0,14
Циліндрове 52							
10	0,5	0,4	0,098	0,31	77,5	0,23...0,57	0,34
20	0,5	0,9	0,081	0,28	31,1	0,75...1,05	0,3
30	0,4	2,1	0,076	0,28	13,3	1,95...2,25	0,3
50	0,4	4,1	0,035	0,19	4,6	4,00...4,20	0,20
70	0,4	11,1	0,027	0,16	1,4	11,01...11,19	0,18
100	0,5	13,9	0,023	0,15	1,1	13,82...13,98	0,16
130	0,4	15,1	0,019	0,14	0,9	15,02...15,18	0,16
150	0,4	23,0	0,018	0,13	0,6	22,93...23,07	0,14
200	0,4	26,9	0,016	0,13	0,5	26,83...26,97	0,14
Бавовняна олія							
10	0,5	1,1	0,120	0,35	31,8	0,90...1,30	0,4
20	0,5	2,0	0,092	0,30	15,0	1,80...2,20	0,4
30	0,5	3,7	0,085	0,29	7,8	3,55...3,85	0,3
50	0,4	5,4	0,071	0,27	5,0	5,25...5,55	0,3
70	0,4	13,0	0,060	0,24	1,8	12,85...13,15	0,3
85	0,4	17,9	0,049	0,22	1,2	17,80...18,00	0,2
100	0,5	20,3	0,031	0,18	0,9	20,20...20,40	0,2
150	0,4	21,0	0,027	0,16	0,8	20,9...21,1	0,2
180	0,5	21,2	0,020	0,14	0,7	21,15...21,25	0,1
Пальмова олія							
10	0,5	2,1	0,100	0,32	15,2	1,92...2,28	0,36
20	0,5	3,8	0,083	0,29	7,6	3,64...3,96	0,32
30	0,4	4,8	0,076	0,28	5,8	4,65...4,95	0,30
50	0,5	9,7	0,049	0,22	2,3	9,58...9,82	0,24
70	0,4	11,0	0,033	0,18	1,6	10,9...11,1	0,2
100	0,4	11,9	0,027	0,16	1,3	11,81...11,99	0,18
130	0,5	12,5	0,20	0,15	1,2	12,42...12,58	0,16
175	0,4	12,7	0,017	0,13	1,0	12,63...12,77	0,14
Графіт							
10	0,5	1,5	0,113	0,34	22,6	1,3...1,7	0,4
20	0,5	3,0	0,082	0,29	9,7	2,8...3,2	0,4
30	0,4	4,4	0,064	0,25	5,7	4,3...4,5	0,2
50	0,4	7,0	0,052	0,23	3,3	6,9...7,1	0,2
70	0,5	8,8	0,038	0,19	2,2	8,7...8,9	0,2
100	0,4	9,7	0,021	0,14	1,4	9,6...9,8	0,2
130	0,4	10,0	0,018	0,13	1,3	9,9...10,1	0,2
150	0,4	11,3	0,020	0,14	1,2	11,2...11,4	0,2
Дисульфід молібдену							
10	0,6	1,8	0,109	0,33	18,3	1,6...2,0	0,4
20	0,5	3,6	0,092	0,3	8,3	3,4...3,8	0,4
30	0,4	5,5	0,071	0,27	4,9	5,4...5,6	0,2
50	0,4	7,9	0,058	0,24	3,0	7,8...8,0	0,2
70	0,5	8,4	0,041	0,2	2,3	8,3...8,5	0,2
100	0,4	8,7	0,025	0,16	1,8	8,6...8,8	0,2
130	0,4	9,0	0,021	0,14	1,6	8,9...9,1	0,2
150	0,4	9,5	0,020	0,14	1,5	9,4...9,6	0,2

тил: вапор, И-50А, пальмова олія, графіт, бавовняна олія і дисульфід молібдену.

Висновки. Встановлено, що на граничну деформацію при глибокому витягу тонколистового прокату впливає дія умов тертя на згині матриці. Тому, для її оцінки введена величина напруги тертя, яка дозволяє отримувати точніший розрахунок характеристики штампування. Визначено, що в діапазоні тисків, що мають місце при штампуванні листового металу, взаємозв'язок між напругою тертя ($\tau_{тр}$) і тиском (q) не може бути описаний однією функцією. Для тисків нижче

50 МПа ця залежність підкоряється закону Амонтона. При більших тисках лінійна залежність порушується. У зв'язку з цим, для оцінки фрикційної взаємодії при штампуванні запропоновано використати дві характеристики тертя: при малих тисках (в притиску) коефіцієнт тертя ($f_{тр}$) і при великих тисках (на згині матриці) напруга тертя ($\tau_{тр}$), яка є фізичною характеристикою дії мастила, що являється, в заданому діапазоні тисків. Такий облік доцільний при штампуванні звичайних сталей і обов'язковий при штампуванні 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. Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В. Зусилля притиску при штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 1. С. 9–17.
3. Hyunok Kim, Ji Hyun Sung, Rajesh Sivakumar, Taylan Altan. Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application)*. 2007. №47(14). Pages 2120-2132.
4. Kim H., Altan T., Yan Q. Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steel (AHSS) using deep drawing and ironing tests. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. № 8. Pages 4122–4133.
5. Lovell M., Higgs C.F., Deshmukh P., Mobley A. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Volume 177, Issues 1–3. Pages 87–90.
6. Tribologia. Tribolotechnika / Redakcia naukova M.Szczerek, M. Wisniewski. Radom: Polckie Towarzystwo Tribologiczne, 2000. 728 s.
7. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
8. Мільман Ю.В., Грінкевич К.Е., Мордель Л.В., Козирев Д.В., Ткаченко І.В., Купрін В.В. Особливості механічних та трибологічних властивостей інтерметалідів на основі алюмінію, нікелю та титану за умов локального навантаження. *Електронна мікроскопія та міцність матеріалів: збірник наук. пр.* Київ: ПІМ НАН України, 2013. Вип. 19. С. 86–95.
9. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbutov A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*. (Brno, 15th – 17th May 2013). Brno, 2013. С. 403 – 407.
10. Максименко О. П., Лясота С.М., Романюк Р.Я. Теорія процесів прокатного, трубного, ковальсько-штампувального та волочильного виробництв: навч. посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 264 с.
11. Убизький М.М., Кулик О.В., Фесенко А.Г., Шевчук Д.І. Холодне листове штампування: навч. посібник. Д.: РВВ ДНУ, 2008. 124 с.
12. Данченко В.М., Гришкович В.О., Головка О.М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ: “Пороги”, 2008. 370 с.
13. Savuliak V. Modelling of the process of regular profiles stamping from sheet. *Buletinul institutului politehnic din Iasi*. 2011. Tomul LVII (LXI). Fasc. 4. P. 199 – 208.
14. Тітов В. А., Злочевська Н. К., Качан О. Я. Технологічна механіка забезпечення міцності та якості деталей пластичним деформуванням. Київ: КВІЦ, 2016. 176 с.
15. Keeler Stuart P. Understanding Sheet Metal Formability. *Machinery and Production Engineering*. 1969. 322 p.
16. Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій / Івченко Л. Й., Черкун В. Ю., Кубіч В. І., Черкун В. В.; за заг. ред. Л. Й. Івченка. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. 116 с.
17. Сусь Б.А., Лад А.І. Фізичні вимірювання і обробка їх результатів: навчальний посібник для самостійної роботи курсантів і студентів. Київ: ВІТІ, 2017. 39 с.
18. Барковський В. В., Н. В. Барковська, О. К. Лопатін. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. К.: ЦНЛ, 2006. 424 с.
19. Бевз Г.П. Довідник з математики. Київ: Рад школа, 1981. 262 с.

Rudasov V.B., Holovina O.V., Yakubovskiy O.M., Moskalenko G.V. ANALYSIS OF CONDITIONS AND FRICTION STRESSES DURING STAMPING OF THIN SHEET HIGH-STRENGTH STEEL ROLLING

The article discusses technological measures unrelated to changes in the shape of the blanks and tools, aimed at improving the stamping of high-strength steels used for manufacturing automotive body parts. The analysis focuses on the stress-strain state of the blanks, considering variations in friction conditions using technological lubricating materials during the sheet stamping process. Mineral oils (transformer and industrial oils), fats (cottonseed and palm oils), and dry lubricating materials such as graphite and molybdenum disulfide were investigated as lubricating materials. The component of the formula determining the total drawing stress of the blank into the die is discussed, specifically the stress formula induced by friction between the blank, pressure pad, and die on its flat portion. It is established that friction conditions in the flange of the blank during the stamping-drawing operation, between the pressure pad and die, and on the curved die are not identical and cannot be described by a single function. Therefore, in the theory of determining the limiting drawing ratio of thin sheet metal to assess friction conditions on the die curvature, the friction stress magnitude on the curved die, denoted as $\tau_{mp.m.}$, is introduced, allowing for a more accurate calculation of stamping characteristics. An experimentally selected method for measuring friction forces, based on the principle of capturing a stationary specimen with a moving instrument with a force proportional to the friction force, was employed. Through interval estimation of the statistical parameters of the experiment, research was conducted on the relationship between friction stress and pressure in the region of relatively low loads, characteristic of stamping using technological lubricating materials. Based on the research results, it is suggested that for stamping both regular steels and high-strength steels, two friction characteristics should be used: the friction coefficient under low pressures and the friction stress under high pressures on the die.

Key words: high-strength sheet steels, stress-strain state, friction stress, friction forces, technological lubricants for stamping.