

УДК 621.9.04

Горбенко О. І.  
Горбенко І. І.  
Дубина В. І.  
Обдул В. Д.

### ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕОРЕТИЧНОГО ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГНУТТЯ ПРОФІЛЬНИХ ТРУБ

Однією із форм контуру та поперечного перетину гнутих деталей є група деталей із профілів, поперечний перетин яких показаний на рис. 1.

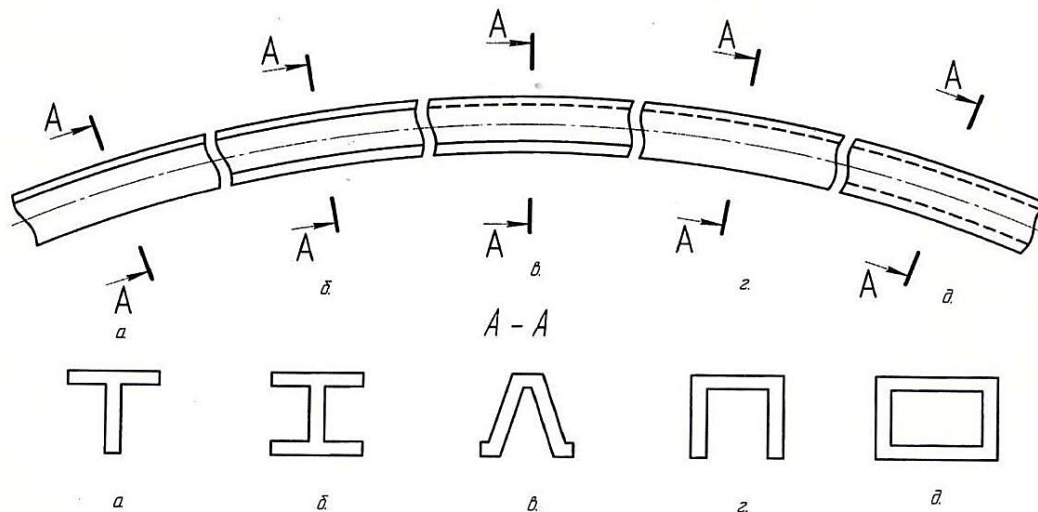


Рис 1. Поперечні перетини деталей із профілів, виготовлених способом пластичного гнуття

Гнуті деталі із профілів характеризуються кривизною контуру і формою поперечного перетину профілю і поділяються на деталі з постійною і змінною кривизною. Виготовлення деталей із профілів прокату методами гнуття вимагає високої точності та якості, оскільки велика жорсткість каркасів обумовлює форму поверхні агрегатів.

Процесу гнуття профілів складної форми приділено ряд дослідницьких праць вчених, серед яких можна виділити праці Вдовіна С. І. [1], Верзілова Ю. Н. [2], Лисова М. Н. [3], Мошніна Е. Н. [4] та інших.

Питаннями моделювання технологічного процесу гнуття труб різних профілів займалися Лящук О. Л. [5], Мошнін Е. М. [4], Сяо Сяотин [6] та інші.

Основними допущеннями у всіх дослідженнях являються:

- гіпотеза плоских перерізів, згідно якої поперечні перетини плоскі та перпендикулярні до поздовжньої осі бруса, що згинається, залишаються плоскими та перпендикулярними до осі бруса після згинання;
- взаємні натиски волокон при гнутті відносно малі при аналізі напруженого стану відповідне напруження приймається рівним нулю;
- коефіцієнт Пуассона при пружно-пластичній деформації  $\mu = 1/2$ .

Мошнін Е. Н. [4] допускає, що відносна тангенціальна деформація  $\varepsilon_1$  будь-якого поздовжнього волокна являється лінійною функцією його відстані від нейтральної осі.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\rho_0 Y}, \quad (1)$$

де  $\rho_0$  — радіус нейтрального шару;  $Y$  — відстань від нейтрального шару до волокна.

Він розрізняє згинання широкого і вузького бруса. Пластичне згинання починається з деякої початкової кривизни, одержаної брусом, що згинається в процесі пружного згинання, коли в крайніх по висоті зонах поперечного перетину проходить під дією згинаючого моменту пластична деформація матеріалу. Максимальна деформація  $\varepsilon_1$  проходить в тангенціальному напрямку і супроводжується деформаціями зворотного знаку в одному або двох напрямках – радіальному  $\varepsilon_2$  та аксіальному  $\varepsilon_3$ , що веде до викривлення поперечного перетину бруса під час гнуття. У широкого бруса аксіальна деформація утруднена. Кривизна бруса, що згинається, викликає натиск поздовжніх шарів один на одного, завдяки чому з'являються радіальні напруження, які мають максимум в нейтральному шарі.

Таким чином, при пластичному згинанні створюється у широкого бруса напружений стан – об'ємний, а деформований – плоский, а у вузького бруса напружений стан – плоский, а деформований – об'ємний. При цьому напружено-деформований стан змінюється по висоті бруса. При пластичному згинанні спостерігається збільшення довжини бруса, що згинається, зменшення його висоти та площі поперечного перерізу, а також його викривлення.

Викривлення профільної заготовки при гнутті досліджено в роботі [1]. В цій праці створена математична модель деформованого поперечного перетину тонкостінного профілю, дискретна математична модель прямокутного в початковому стані поперечного перетину заготовки, що деформується, а також наведено аналітичне розв'язання цієї задачі. Проте в розв'язанні не враховані зовнішні поперечні сили: автор вважає, що заготовка навантажена тільки згинаючим моментом. Також не враховано зміну товщини стінок профілю в процесі гнуття.

Визначення положення нейтрального шару під час гнуття є дуже важливою задачею, вирішення якої дозволяє обчислити деформації в поздовжніх шарах тіла, що згинається.

При пластичному гнутті елементів, поперечний перетин яких має дві вісі симетрії, нейтральний шар збігається з центром тяжіння перетинів. Для перетинів з однією віссю симетрії, в площині якої проводиться вигин, нейтральний шар (на відміну від пружного вигину) не збігається з центром тяжіння площі поперечного перетину. В загальному випадку Лисов М. І. [3], розглядаючи узагальнену (комплексну) форму поперечного перетину допускає, що пружне ядро не виходить за межі висоти стінки і зони пружної деформації розміщуються на дільниці перетину постійної ширини. Приймаючи до уваги відносно малу товщину полицки в порівнянні з висотою стінки, вказане припущення буде справедливим для широкого діапазону радіусів кривизни, верхнє граничне значення якого визначається виразом:

$$\rho_0 \leq \Delta h / \varepsilon_p,$$

де  $\Delta h$  – відстань від центру тяжіння до полки перетину.

Якщо вигин проводиться на радіус кривизни більше граничного  $\rho_{0 \max}$ , то зона пластичних деформацій істотно менше зони пружних деформацій і її впливом на положення нейтрального шару можна знехтувати, тобто в цьому випадку нейтральний шар можна визнати таким, що проходить через центр тяжіння поперечних перетинів.

Положення нейтрального шару при чистому гнутті Лисов М. Н. [3] визначає із умови рівноваги внутрішніх сил в перетині

$$\int_{f_{\text{розт}}} \sigma dF = \int_{f_{\text{стис}}} \sigma dF; \quad (2)$$

де  $\sigma$  – нормальне напруження в площині перетину;  $F$  – площа поперечного перетину, на якій діють напруження розтягування або стиску.

Рівняння рівноваги при лінійно-ступеневій залежності  $\sigma - \varepsilon$  після інтегрування і перетворення має такий вигляд:

$$b_1 [Y_n n + 1 - (h_1 - Y_n) n + 1] + b_2 [(Y_n + h_2) n + 1 + Y_n n + 1] - b_3 [(h_1 - Y_n + h_3) n + 1 - (h_1 - Y_n) n + 1] = 0 \quad (3)$$

де  $Y_n$  – відстань від нейтрального шару;  $b_1, b_2, b_3, h_1, h_2, h_3$  – відповідно ширини та висоти елементів поперечного перетину профілю прокату.

Рівняння (3) не розв'язується в явному вигляді відносно величини  $Y_n$ , яка шукається. Знаходження останньої можливе графо-аналітично. З цією метою по рівнянню необхідно побудувати сімейство кривих  $Y_n = f(b_1, h_1)$  для призначеного матеріалу.

Із наведеного знаходження положення нейтрального шару витікає, що на сьогодні відсутні аналітичні залежності його відстані від ширини та висоти профілю, а знаходження графоаналітичним способом є трудомістким.

Мошнін Е. Н. [4] розрізняє поперечне згинання та чисте гнуття. При поперечному гнутті брус знаходиться під дією сил, прикладених перпендикулярно до поздовжньої осі, а при чистому гнутті до бруса прикладений тільки згинаючий момент. На відміну від чистого гнуття, при поперечному гнутті брус знаходиться під дією згинаючого моменту, безперервно змінюваного по довжині бруса та поперечних сил. Від згинаючого моменту появляються нормальні напруження, а від поперечних сил – напруження дотикання.

Технологічні процеси штампування здійснюються переважно поперечним згинанням. Як показує Мошнін Е. Н. [4] вплив дотичних напружень при малій відстані між опорами  $U$  (для сталі з малим вмістом вуглецю  $U < 5h$ ) дії дотичних напружень виявляють значні впливи на характер деформування бруса. При поперечному пластичному гнутті з малою відстанню між опорами буде проходити, за наявності дотичних напружень пластичне зрушення одних поздовжніх шарів бруса, що згинається, відносно інших, внаслідок чого спочатку плоскі поперечні перерізи бруса в процесі гнуття одержують викривлення, тобто деплантація перетинів. Найбільше викривлення має місце на нейтральному шарі, де дотичне напруження досягає максимуму, а в крайніх шарах викривлення практично не спостерігаються. Якщо дотичне напруження досягає межі плину при зрушенні по всій довжині бруса, то тоді пластичне зрушення буде спостерігатися вздовж усього бруса, а найбільше викривлення одержують торцеві поверхні та області, прилеглі до них.

Процес деплантації перетинів, прилеглих до торцю заготовки, при поперечному гнутті в теперішній час недостатньо добре вивчений і виписаний аналітично.

Ляшук О. Л. [5] наводить результати теоретичних досліджень напружено-деформованого стану виготовлення соленоїдів із труб прямокутного поперечного перетину. В цій праці виведено аналітичні залежності для визначення граничних напружень у зоні згину соленоїда, зміни товщини його стінок і значення нейтрального радіуса згину, а також залежність моменту тангенціальних напружень від внутрішнього радіуса соленоїда.

Для знаходження нейтрального радіуса соленоїда  $r_n$  приведена система рівнянь

$$\sigma_{pz} = -\beta\sigma_s \ln \frac{r_3}{\rho} \quad (4)$$

$$\sigma_k = \frac{N}{B_r} \quad (5)$$

Оскільки аналітичне розв'язання даної системи неможливе, нейтральний радіус напружень знаходиться числовим методом, використовуючи ЕОМ.

Сяо Сяотин [6] дослідив новий метод гнуття труб прямокутного перетину для одержання малого радіуса гнуття – гнуття шляхом прошовхування через канал матриці.

В цій праці наведено математичні залежності процесу гнуття труб, універсальна методика розрахунку силових параметрів процесу, визначення критичного кута по утворенню гофр при локальній втраті стійкості при гнутті труб шляхом прошовхування через канал матриці.

Вказаний метод застосовується тільки для гнуття коротких труб в умовах дрібносерійного виробництва.

Верзілов Ю. Н. [2] виклав результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню параметрів деформованого стану при гнутті вузького бруса: зміни ширини та висоти бруса, який згинається. Специфіка виготовлення деталей методом гнуття вузького

брусу полягає в тім, що при гнутті заготовки на відносні радіуси  $r_B = \frac{R_B}{h_0} = 1 \dots 5$  проходять

суттєві зміни форми та розмірів поперечного перерізу – прямокутний переріз становиться трапецієвидним та зменшується по висоті.

В цій же праці встановлено, що зміцнення при гнутті на  $r_B > 1$  практично не впливає на величину зміни ширини брусу, який згинається (вплив не перевищує 1,5 %).

Залежності, які визначають параметри деформованого стану (радіус нейтрального шару деформації, зміна висоти і форми поперечного перерізу брусу, який згинається) та не враховані зміцнення з достатньою для практики точністю, можна використати для вивчення цих параметрів при гнутті заготовки в холодному стані.

Горбенко О. І., Горбенко І. І., Осіпчук В. В., Стрелковський В. В. [7] розробили спосіб гнуття прямокутних труб, що полягає у одночасному сплюсненні та гнутті трубних заготовок, який відрізняється від аналогів тим, що операцію сплюснювання та гнуття виконують на штампі, при цьому трубу розміщують на опорно-затисних роликах між передньою рухомою і задньою нерухомою бічними стінками, причому відстань між бічними стінками встановлюють перестановкою рухомої бічної стінки на максимальний розмір ширини труби, щоб центр гнуття знаходився на вертикальній осі згинального пуансона, а згинальний пуансон посередині радіусної поверхні виконують з виступом.

Для визначення напружено-деформованого стану вигнутої труби застосовано метод випробовування твердості.

Згідно теорії Деля Г. Д. [8] розподіл твердості однозначно визначає розподіл напружень і деформацій в зразках зі сталі конкретної марки незалежно від схеми напруженого стану. Метод оснований на зміні показника твердості металу внаслідок його пластичної деформації. При виявленні залежності між твердістю і інтенсивністю напружень і деформацій, твердість визначають стандартними методами. Шляхом випробовування зразків з досліджуваного матеріалу на розтягування і паралельних замірів твердості будують тарувальний графік, який зв'язує інтенсивність напружень, твердість і інтенсивність деформацій.

## ВИСНОВКИ

- При пластичному згинанні створюється у широкого брусу напружений стан – об'ємний, а деформований – плоский, а у вузького брусу напружений стан;

- при гнутті вузького брусу на відносні радіуси  $r_B = \frac{R_B}{h_0} = 1 \dots 5$  проходять суттєві змі-

ни форми і розмірів поперечного перетину – прямокутний переріз становиться трапецієвидним і зменшується по висоті;

- при аналітичному розв'язанні математичної моделі деформованого поперечного перетину тонкостінного профілю прийнято, що заготовка навантажена тільки згинаючим моментом і не враховані зовнішні поперечні сили та зміна товщини стінок;

- в науково-технічній літературі відсутні аналітичні залежності відстані нейтрального шару від ширини та висоти профілю, а графоаналітичний спосіб його знаходження є трудомістким процесом;

- теорія пластичного гнуття полоси на ребро із-за складності процесу недостатньо розроблена і слабо висвітлена в науково-технічній літературі;

- процес деплантації перетинів, прилеглих до торцю заготовки, при поперечному гнутті на сьогодні недостатньо вивчений та виписаний аналітично;

- автори теоретичних досліджень гнуття профільних труб розробили багато математичних моделей технологічних процесів їх виконання, однак вони не врахували ряд технологічних факторів і мають ряд припущень, що робить їх несумісним з реальними процесами на виробництві.

Перевагами методу випробовування твердості для визначення напружено-деформованого стану вигнутої труби є:

- простота дослідження;
- можливість дослідження напружено-деформованого стану в об'ємі металу, не застосовуючи його попереднього перетину, який призводить до явних погрішностей. В цьому випадку зразок після деформування шліфують на незначну величину і заміряють твердість. Похибка визначення твердості від операції шліфування дуже незначна.
- можливість визначення напружено-деформованого стану на натурних зразках, підданих руйнуванню або працюючих в визначених умовах, і, таким чином, установлення причин руйнування або умов роботи деталі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вдовин С. И. *Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок* / С. И. Вдовин. – М. : Машиностроение, 1988. – 160 с.
2. Верзилов Ю. Н. *Определение параметров деформированного состояния при пластическом изгибе узкого бруса* / Ю. Н. Верзилов // *Формоизменение при обработке металлов давлением*. – Ростов-на-Дону, 1970 – 9 с.
3. Лысов М. Н. *Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки* / М. Н. Лысов. – М. : Машиностроение, 1966. – 236 с.
4. Мошнин Е. Н. *Гибка, обтяжка и правка на пресах* / Е. Н. Мошнин. – М. : Машиностроение, 1959. – 357 с.
5. Лящук О. Л. *Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей* / О. Л. Лящук, А. Я. Палюх, А. Б. Гупка // *Вісник ЗНТУ*. – 2011. – Том 16. – № 1. – С. 83–90.
6. Сяо Сяотин. *Совершенствование технологии гибки труб прямоугольного сечения проталкиванием*: дис. канд. техн. наук. / Сяо Сяотин. – Москва, 2004. – 178 с.
7. Пат. 78751 МПК В 21 D 9/00. *Спосіб гнуття прямокутних труб* / О. І. Горбенко, І. І. Горбенко, Ю. В. Осипчук, В. В. Стрелковський. *Опубл.* 25.03.2013. – *Бюл.* № 6. – 4 с.
8. Дель Г. Д. *Определение напряжений в пластической области по распределению твердости* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971.

### REFERENCES

1. Vdovin S. I. *Metody rascheta i proektirovaniya na JeVM processov shtampovki listovih i profil'nyh zagotovok* / S. I. Vdovin. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 160 s.
2. Verzilov Ju. N. *Opređenje parametrov deformirovanogo sostojanija pri plastičeskom izgibe uzkogo brusa* / Ju. N. Verzilov // *Formoizmenenie pri obrabotke metallov davleniem*. – Rostov-na-Donu, 1970. – 9 s.
3. Lysov M. N. *Teorija i raschet processov izgotovlenija detalej metodami gibki* / M. N. Lysov. – M. : Mashinostroenie, 1966. – 236 s.
4. Moshnin E. N. *Gibka, obtjazhka i pravka na presah* / E. N. Moshnin. – M. : Mashinostroenie, 1959. – 357 s.
5. Ljashhuk O. L. *Tehnologichni osnovi formoutvorennja special'nih profil'nih gvin-tovih detalej* / O. L. Ljashhuk, A. Ja. Paljuh, A. B. Gupka // *Visnik TNTU*. – 2011. – Tom 16. – № 1. – S. 83–90.
6. Sjaot'in. *Sovershenstvovanie tehnologii gibki trub prjamougol'nogo sechenija protalkivaniem*: dis. kand. tehn. nauk. / Sjaot'in. – Moskva, 2004. – 178 s.
7. Pat. 78751 MPK V 21 D 9/00. *Sposib gnut'tja prjamokutnih trub* / O. I. Gorbenko, I. I. Gorbenko, Ju. V. Osipchuk, V. V. Strelkovs'kij. *Opubl.* 25.03.2013. – *Bjul.* № 6. – 4 s.
8. Del' G. D. *Opređenje naprjazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeleniju tverdosti* / G. D. Del'. – M. : Mashinostroenie, 1971.

Горбенко О. І. – інженер, ТОВ «ВЕРДА»;

Горбенко І. І. – канд. техн. наук, дійсний член АІНУ, ТОВ «ВЕРДА»;

Дубина В. І. – канд. техн. наук, проф. ЗНТУ;

Обдул В. Д. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя.

E-mail: kafedra\_omt@zntu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 25.09.2015 г.