

УДК 669.14.018:621.78

ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ВИГОТОВЛЕННЯ ХОЛОДНОЮ ОБ'ЄМНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ ВИРОБІВ ІЗ МАЛОПЛАСТИЧНИХ СТАЛЕЙ

**І.В. Дощечкіна, доц., к.т.н., В.А. Коблик, студ.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Показано ефективність використання метода гідродинамічного видавлювання для отримання виробів із малопластичних ресорно-пружинних сталей із підвищеним комплексом механічних властивостей.

Ключеві слова: гідродинамічного видавлювання, сталь, дислокаційна структура, механічні властивості, конструкційна міцність.

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ СТАЛЕЙ

**И.В. Дощечкина, доц., к.т.н., В.А. Коблик, студ.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

Аннотация. Показана эффективность использования метода гидродинамического выдавливания для получения изделий из малопластичных ресорно-пружинных сталей с повышенным комплексом механических свойств.

Ключевые слова: гидродинамическое выдавливание, сталь, дислокационная структура, механические свойства, конструкционная прочность.

EFFECTIVE METHOD OF PRODUCTION BY COLD VOLUME DEFORMATION OF PARTS MADE OF LOW-DUCTILE STEEL

**I. Doschekhina, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), V. Koblik, St.,
Kharkov National Automobile and Highway University**

Abstract. The efficiency of applying the of hydrodynamical extrusion for producing items using low – ductile spring steel with increase of a complex of mechanical properties is shown.

Key words: hydrodynamical extrusion, steel, dislocation structure, mechanical properties, structural strength.

Вступ

Одним з найефективніших способів холодної об'ємної обробки металів тиском є гідроекструзія (ГЕ) – пресування виробів у замкнутому контейнері рідиною під високим тиском. Цей метод є позаконкурентним у процесі обробки тиском високоміцних та малопластичних матеріалів, бо має безперечні переваги: значна пластифікація металу і можливість обробки його з великим ступенем деформації за один прохід без тріщин і роз-

шарування, однорідність деформації, висока якість поверхні, значне зменшення (~ на 40 %) питомого тиску пресування і підвищення стійкості матриць, покращення структури та властивостей металу, який обробляється. Однак ГЕ має і суттєві недоліки – потребує складного і коштовного обладнання, якого ще недостатньо на металообробних підприємствах України, а сам процес є малопродуктивним. Актуальним завданням є пошук більш простого та дешевого способу виробництва заготовок із важкодеформівних

матеріалів холодною обробкою тиском за умови збереження всіх переваг ГЕ.

Аналіз публікацій

Метод холодного видавлювання (пресування) – це один із найбільш прогресивних та поширених процесів обробки металів тиском, бо дозволяє виготовляти вироби дуже точних розмірів та форми з високою чистотою поверхні. Заготовки (або готові деталі), що отримані пресуванням, більш економічні порівняно із прокаткою чи штампуванням, коли необхідна подальша механічна обробка. Крім того, значний асортимент виробів складної конфігурації не може бути забезпечений іншими способами пластичної обробки.

Процес пресування здійснюється в умовах усебічного об'ємного стискання, яке підвищує низьку природну пластичність матеріалу, однак трьохосовий тиск відбувається під впливом значних зусиль, що потребує підвищених витрат енергії на одиницю об'єму металу, який деформується. Особливо важко здійснювати холодне пресування високоміцних малопластичних матеріалів. Між металом, що деформується, та пресовим інструментом виникають значні сили тертя, які, навіть за умови використання високоефективних мастил, суттєво знижують його стійкість і підвищують енергоємність процесу, бо на їх подолання витрачається близько 60 % зусиль. Наявність сил тертя не дозволяє отримати однорідну деформацію заготовки, а отже, і однорідні властивості матеріалу, який підлягає деформації. Варто також зазначити, що після холодної деформації вироби суттєво наклепані й потребують спеціальної термічної обробки для повернення пластичності та підвищення опору крихкому руйнуванню.

Значною мірою цих недоліків позбавлений метод гідроекструзії (ГЕ), коли холодний метал деформується в умовах «м'якого» тертя [1–5]. Заготовка, що розміщена в замкнутому контейнері, видавлюється через матрицю рідиною під великим тиском (10^2 – 10^4 МПа). Між заготовкою, матрицею, та контейнером існує тонкий шар рідини, який під тиском створює (гідродинамічний) мастильний ефект і практично нівелює сили тертя. Як робочу рідину застосовують воду, емульсії, мінеральне та касторове масло, гліцерин, бензин із різними присадками [4–8]. У цьому випадку в 2–3 рази знижується зусилля де-

формування, скорочується кількість проходів, забезпечується рівномірність деформації за перерізом та довжиною виробу, точність його розмірів і висока чистота поверхні.

Найважливішим параметром процесу ГЕ є тиск видавлювання P , на величину якого впливають характеристики металу, що деформується, матеріал і геометрія матриці, а також властивості робочої рідини. Другий важливий показник – якість поверхні виробу, що має особливе значення для майже 70 % деталей, які потребують високих показників втомної міцності. Шорсткість поверхні зменшується зі збільшенням ступеня деформації, але для цього потрібний високий тиск деформування, а це призводить до дострокового виходу з ладу ущільнень та зношування матриць. З урахуванням цих факторів, заготовки зі сталей з рівнем міцності $\sigma_b = 800$ – 1200 МПа у процесі гідроекструзивної обробки варто деформувати зі ступенем ~ 40 – 50 %. Вихідна міцність сталі також суттєво впливає на якість поверхні, що деформується: чим вона вища, тим менша шорсткість поверхні. У роботі [9] надана номограма, що дозволяє визначити якість поверхні та тиск видавлювання залежно від ступеня деформації для сталей з різною вихідною міцністю.

У багатьох дослідженнях встановлено, що високий гідростатичний усебічний тиск та інтенсивна деформація значно змінюють властивості матеріалів, які обробляються [2, 10, 11]. Суттєве збільшення пластичності та зростання ударної в'язкості матеріалів за умови збереження, навіть підвищення міцності, обумовлено формуванням специфічної більш досконалої дислокаційної (так званої барофрагментованої) субструктури (12–14). Наявність і характер такої субструктури залежать від величини тиску, ступеня та швидкості деформації [9, 12, 13].

Для виробів, які після ГЕ підлягають зміцнювальній термічній обробці (гартуванню з відпуском), з метою збереження термічної стабільності дислокаційної структури, що утворилася внаслідок деформації, застосовують післядеформаційний відпуск за умов певної температури. Відпуск забезпечує отримання максимально досконалої та термічно стійкої полігональної субструктури та її закріплення домішковими атомами вуглецю та азоту, а також високодисперсними частками хімічних з'єднань з цими елементами

(карбідів, нітридів, карбонітридів) [12]. Як наслідок, у процесі наступного швидкого нагрівання виробів під гартування з наступним швидким охолодженням має місце ефект спадковості за умови α - γ - α -перетворень. Дрібнозерниста структура наклепаного аустеніту з границями, що зміцнені дисперсними частками легованих карбідів, має підвищений запас пластичності та ударної в'язкості. Така структура успадковується мартенситом, і має місце зміцнення без втрати показників, які запобігають окрихченню матеріалу.

Поєднання збільшених значень міцності, пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості характеризує підвищення конструкційної міцності [15] матеріалу виробів, виготовлених методом ГЕ. А це одне із найважливіших завдань сучасного машинобудування в умовах ускладнення конструкцій, збільшення швидкостей руху механізмів та їх експлуатаційних напружень.

Дуже привабливий як своїми технологічними перевагами, так і підвищенням експлуатаційних властивостей виробів метод ГЕ має і суттєві недоліки – кошовне, конструктивно складне та малопродуктивне обладнання; труднощі у процесі його експлуатації; недосконалість ущільнювальних вузлів для затримання високого тиску рідини, а також потреба в багатошарових контейнерах; дуже різке зростання швидкості руху (сотні метрів за секунду) достатньо міцної заготовки з зростанням тиску рідини, що потребує складних і потужних гальмівних пристроїв.

У зв'язку з цим актуальним є пошук більш простого і дешевого способу обробки тиском легованих сталей, які важко деформуються, із збереженням безумовних переваг ГЕ – отримання виробів будь-якої складної форми з точними розмірами, матеріал яких набуває необхідних механічних властивостей для складних умов експлуатації.

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є обґрунтування доцільності використання простого і дешевого методу гідродинамічного видавлювання (ГДВ) для виготовлення заготовок важконавантажених деталей приводу нагнітальника двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) із міцної та малопластичної легованої сталі.

Матеріал і методики дослідження

На підприємстві деталі приводу нагнітальника форсованого ДВЗ (вали та пружини) експлуатуються в умовах пружної деформації під значним тиском і виготовляються з ресорно-пружинної сталі 4ХН2МФА, хімічний склад якої наведено у табл. 1.

Суть методу полягає в такому. Перед розміщенням заготовки в контейнері вона густо змащується веретенним маслом, яке є своєрідним квазірідким середовищем. Під тиском це середовище діє лише на циліндричну поверхню заготовки, а її верхній торець контактує безпосередньо з металевим плунжером. За умови значного тиску плунжера на мастило створюються умови гідродинамічного видавлювання, реалізується схема всебічного стискання матеріалу. У випадку такої схеми деформування майже повністю відсутні напруження розтягання дозволяють деформувати заготовку на 40 % за один прохід. Як і за умови ГЕ, заготовка рівномірно деформується за перерізом та довжиною, зменшуються зусилля пресування. Після деформації заготовки проводили стабілізуючий відпуск за умови 350 °С з витримкою 3 години для забезпечення термічної стабільності субструктури деформованого металу.

Кінцевою була зміцнювальна термічна обробка заготовок – гартування від температури 870 °С в мінеральному мастилі та наступний низький відпуск за умови 220 °С протягом 2,5 годин. Для більш повного збереження субструктури деформованої методом ГДВ сталі нагрів під гартування проводили в соляній ванні, щоб суттєво скоротити час знаходження її в умовах високих температур і запобігти росту зерна (рис. 1).

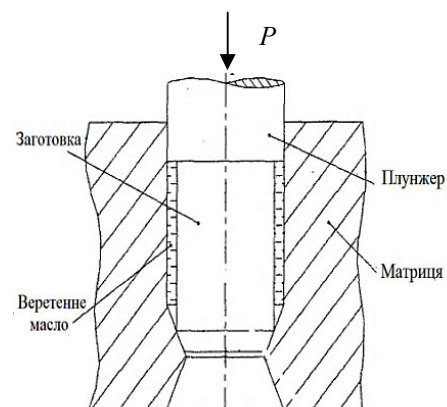


Рис. 1. Схема отримання заготовок методом ГДВ

Таблиця 1 Хімічний склад сталі

Вміст елементів, %								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0,43–0,50	0,5–0,8	0,17–0,36	0,9–1,1	1,3–1,8	0,2–0,3	0,12–0,18	0,2	<0,02

З метою перевірки рівномірності деформації розподіл твердості, дослідження макро- і мікроструктури проводили в поздовжньому та поперечному перерізах деформованої заготовки. Твердість вимірювалася за Віккерсом на твердомірі UIT HV-10/30/50 згідно з ГОСТ 2999-75. Значення твердості визначалися за умови зусилля 294,3 Н через кожні 2 мм.

Дислокаційна структура досліджувалася методом трансмісійної електронної мікроскопії на РЕМ106. Механічні характеристики (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , КСУ) сталі визначалися за стандартними методами. Випробування на втому проводили на машині МУИ-6000 на найбільш жорсткому циклі – чистий згин з обертянням.

Результати дослідження

У вихідному стані після гартування з наступним середнім відпуском сталь мала бейнітну структуру з ділянками троститу по границях зерен. Розмір зерна дорівнював $\sim 0,03$ мм. Така структура забезпечує високу границю текучості, але у цьому випадку знижуються тимчасовий опір (σ_b) та пластичність сталі. Оскільки валик нагнітальника є важконавантаженим, то необхідно зберегти на високому рівні σ_b . Для цього достатньо знизити температуру відпуску.

Після гартування з низьким відпуском (200–220 °С) сталь мала структуру грубого мартенситу (рис. 2) з твердістю по перерізу 530 HV.

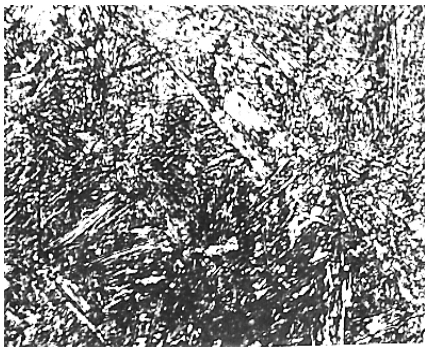


Рис. 2. Мікроструктура сталі після гартування і низького відпуску, $\times 500$

Така термообробка за умови достатньо високої міцності призводить до зниження показників пластичності та тріщиностійкості.

З метою збереження міцності в поєднанні з високими характеристиками пластичності та ударної в'язкості заготовку сталевого валика нагнітальника діаметром 25 мм виготовили методом ГДВ з наступним стабілізуючим відпуском. У цьому випадку твердість збільшилася до 275–285 HV через наклеп і за перерізом та довжиною заготовки вона майже не відрізнялася (її відхилення в межах похибки – усього на 10 HV).

Після кінцевої зміцнювальної термічної обробки – гартування і низького відпуску фіксується структура дрібногочастого мартенситу з твердістю 550–560 HV з дрібними карбідами (рис. 3).

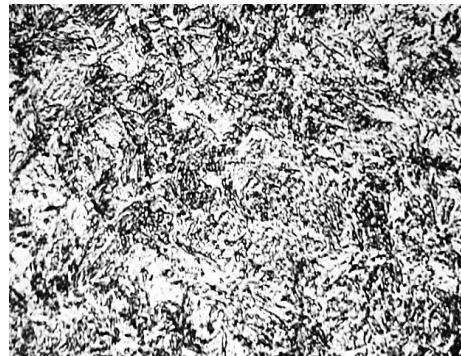


Рис. 3. Мікроструктура сталі після ГДВ та стабілізуючого відпуску, $\times 500$

Порівняно зі структурою недеформованої сталі (рис. 2) структура сталі після деформації ГДВ та однакової термічної обробки більш дисперсна. Крім того, унаслідок всебічного стиснення матеріалу під високим тиском у процесі ГПД значно змінилася тонка структура. Сформувалися високодисперсні комірки з розміром 0,2–2 мкм, усередині яких майже немає дислокацій і які значно розорієнтовані (до 12°) (рис. 4).

Утворення цієї субструктури можна розглядати як подрібнення зерна, оскільки субграниці з такою розорієнтацією впливають на механічні властивості аналогічно границям

зерен [12]. Зменшення розміру зерна, як відомо, забезпечує зростання пластичності та ударної в'язкості, що ускладнює виникнення, розкриття та розповсюдження тріщин.



Рис.4. Субструктура сталі після ГДВ, $\times 400$

Стабілізуючий відпуск удосконалює барофрагментовану субструктуру, сформовану у процесі ГДВ, закріплює її домішковими атомами. Унаслідок під час подальшого швидкого нагрівання під гартування вдається заглушити рекристалізацію та підвищити експлуатаційні властивості сталі за рахунок ефекту спадковості за умови α - γ -перетворення.

Ці структурні зміни суттєво вплинули на механічні властивості сталі.

Результати випробування на розтягання та ударну в'язкість заготовок до деформації та після деформації ГДВ, які підлягали однакової зміцнювальній термічній обробці – гартуванню з низьким відпуском, відображені в табл. 2.

Однією із важливіших характеристик сталей, які використовуються для виробів, що експлуатуються в умовах пружних деформацій, є опір руйнуванню за умови циклічних навантажень – опір втомі. Показники випробувань заготовок в різному стані на втому наведені в табл. 3.

Як свідчать таблиці, усі механічні властивості після ГДВ значно підвищуються. Це пояснюється подрібненням мікроструктури, а також і змінами тонкої субструктури. Як видно з табл. 3, після виготовлення заготовок ГДВ з подальшою термічною обробкою їх опір втомі, тобто довговічність, підвищується втричі.

Таблиця 2 Механічні властивості заготовок після різних варіантів обробки

Стан заготовки	Механічні властивості, %				
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КС, Дж/см ²
Термообробка без попередньої деформації	1950–1960	1740–1800	8–10	30–34	36–37
ГДВ + термообробка	2190–2200	1850–1900	14–16	52–53	54–55

Таблиця 3 Результати випробувань заготовок на втому після різних варіантів обробки

Стан заготовки	Номер зразка	Кількість циклів навантаження до руйнування	Середня кількість циклів до руйнування
До деформації термообробка	1	–	871400
	2	794000	
	3	850000	
	4	890000	
	5	1 042000	
ГДВ + термообробка	1	2068000	2649000
	2	2354000	
	3	2787000	
	4	2931000	
	5	3105000	

Варто зазначити, що механічні властивості заготовок, які деформовані ГЕ та ГДВ з наступною однаковою термічною обробкою дещо відрізняються (табл. 4), а саме – вони вищі після ГДВ.

Таку різницю властивостей можна пояснити різною будовою коміркової субструктури. Після ГЕ комірки більші, в них більша густина дислокацій і вони мають ширші границі. Як результат, у заготовок декілька більша міцність, але менші пластичність та ударна в'язкість.

Таким чином, заготовки, отримані ГДВ, мають більш високу конструкційну міцність і відповідають потрібним експлуатаційним вимогам до важконавантажених валиків зі сталі 4ХН2МФА-Ш, які підлягають дії пружної деформації.

Висновки

Гідродинамічне видавлювання з подальшою термічною обробкою (гартування з низьким відпуском) є ефективним і перспективним методом виробництва заготовок та готових деталей із легованих малопластичних, високоміцних сталей у зв'язку з підвищенням їх конструкційної міцності та зменшенням вартості виробів за рахунок спрощення технології виготовлення та безвідходності процесу.

Література

1. Береснев Б.И. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии / Б.И. Береснев, К.И. Езерский. – М.: Наука, 1981. – 240 с.
2. Береснев Б.И. Процесс гидроэкструзии / Б.И. Береснев, Е.В. Трушин. – М.: Наука, 1976. – 200 с.
3. Колпашников А.И. Гидропрессование металлов / А.И. Колпашников, В.А. Вялов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
4. Галкин А.А. Прессование металлов жидкостью / А.А. Галкин, А.П. Гетманский. – Донецк, 1974. – 81 с.
5. Прозоров Л.В. Прессование металлов жидкостью высокого давления / Л.В. Прозоров, А.А. Костава, В.Д. Ревтов. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
6. <http://knowledge.su/g/gidroekstruziya>.

7. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
8. Пью Х.Л.Д. Гидроэкструзия / Х.Л.Д. Пью // Механические свойства металлов под высоким давлением. – 1973. – Т. 2. – С. 9–160 с.
9. Дьяченко С.С. Гидропрессование как малоотходный способ изготовления изделий с улучшенными свойствами / С.С. Дьяченко, Н.Г. Александров, Е.Л. Милославская, В.А. Золотко. – Х.: Основа, 1991. – 105 с.
10. Важенцев Ю.Г. Влияние схемы деформации на пластичность материалов при гидростатической обработке / Ю.Г. Важенцев, В.В. Исаев // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 13. – С. 6–9.
11. Белошапка В.Д. Теория и практика гидроэкструзии / В.Д. Белошапка, В.П. Варюхин, В.З. Спусканюк. – К.: Наукова думка, 2007. – 246 с.
12. Токий В.В. О механизме формирования упорядоченной дислокационной структуры металлов, деформированных при высоком гидростатическом давлении / В.В. Токий, В.И. Зайцев, В.П. Филатов // Украинский физический журнал. – 1973. – Т. 18. – С. 1178–1181.
13. Зайцев В.И. Упорядочение дислокационных ансамблей в условиях высокого гидростатического давления / В.И. Зайцев, В.А. Стрельцов, А.А. Добриков // Физика высоких давлений: сборник. – 1979. – С. 119–145.
14. Дьяченко С.С. Принципы реализации наследственности упрочнения при фазовых превращениях / С.С. Дьяченко, В.А. Золотко // Известия вузов. ЧМ. 1991. – № 10. – С. 106–109.
15. Дьяченко С.С. Матеріалознавство: підручник / С.С. Дьяченко, І.В. Дошечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.

Рецензент: Д.Б. Глушкова, професор, д.т.н., ХНАДУ.