

ДОВГОВІЧНІСТЬ ПРУЖНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ, ОБРОБЛЕНИХ ВТМО ТА ДСМ

© Кукляк М.Л., Кусий Я.М., 2006

Узагальнено досвід підвищення довговічності пружних деталей транспортних машин в умовах кручення шляхом застосування термомеханічного зміцнення, об'ємного та поверхневого пластичного деформування. холодне деформування після термомеханічного зміцнення доцільно застосовувати з мінімально можливим ступенем деформування для досягнення достатнього запасу пластичних властивостей для забезпечення необхідної довговічності з одночасним підвищенням робочих напружень.

The experience of elastic details durability increasing in twisting conditions by means of thermal-mechanical hardening, volumetric and plastic deformation is generalized. cold deformation after thermal-mechanical hardening are desirable for using with a minimally possible deformation's degree. this method allows to reach a sufficient stock of plastic properties, raising durability.

Сучасний стан проблеми щодо циклічної міцності. Серед найважливіших показників якості виготовлення деталей машин є вимоги до їхньої міцності та довговічності, оскільки найпоширенішим видом порушення працездатності деталей в умовах кручення є їхнє руйнування внаслідок втрати циклічної міцності.

Відомо, що надійність роботи машин залежить, передусім, від надійності найбільше навантажених елементів. Тому для цих деталей необхідно підвищувати рівень допустимих напружень.

Експлуатаційні властивості деталей машин формуються у процесі виливання, оброблювання тиском та холодного механічного різання, визначаються не тільки властивостями матеріалів деталей, застосовуваних у заданій конструкції, а й технологічними факторами, які зв'язані зі способом їхнього отримання. Тому з огляду втомленості важливого значення набуває вибір конструкції та технології їхнього виготовлення.

Традиційні методи підвищення надійності вичерпали свої можливості, тому запропоновано метод зміцнення (ВТМЗ – високотемпературне термомеханічне зміцнення), що поєднує в собі процес термічного й механічного оброблювання і сприяє створенню високорозвинутої субструктури, якій притаманні високі механічні властивості – міцність та пластичність (рис.1) [1].

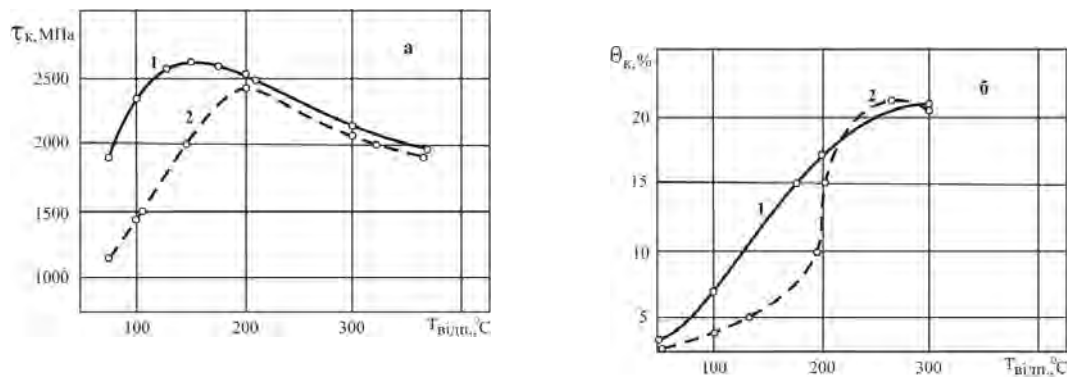


Рис. 1. Вплив ВТМО крученням на механічні властивості високовуглецевої сталі:
а – міцність, б – пластичність; 1 – після ВТМЗ, 2 – після гартування

В умовах повторно-змінних напружень руйнування переважно починається з поверхні деталі, тому стан поверхневих і приповерхневих шарів металу здебільшого зумовлює її витривалість.

Отримані за рахунок *ВТМЗ* високі показники пластичності (рис.1) та підвищена схильність до зміцнення мартенситу [2] сприяють застосуванню комплексного зміцнення за допомогою *ВТМЗ* та деформаційного старіння мартенситу (*ДСМ*) для подальшого підвищення конструктивної міцності торсіонів.

Для виготовлення торсійних валів у промисловості використовують середньолеговану конструкційну сталь 45ХН2МФА, яку після гартування піддають відпуску та поверхнево-пластичному зміцненню. Цю операцію здійснюють кулько-струменевим нагартуванням, обкочуванням чи іншими методами. Названі види зміцнювального холодного оброблювання створюють на поверхні деталі-торсіона напруження стиску, що підвищує границю втомлюваності [3].

Для торсіонів, що працюють у пружній області, особливого значення набуває підвищення границі пропорційності, оскільки ця характеристика визначає діапазон робочих напружень валів і розширює конструктивні можливості їх використання.

Обґрунтування вибору методики зміцнення. Як поверхнево-пластичне деформування, так і заневолювання призводять у кінцевому підсумку до вичерпання ресурсу пластичності; матеріал торсіона окрихчується, стає чутливим до найменших концентраторів напружень.

Враховуючи сприятливий вплив *ВТМЗ* на механічні властивості матеріалу в умовах статичного навантаження та допущення, що втомлювальна міцність τ_w є функцією добутку статичної міцності τ_b , й пластичності θ [4], тобто

$$\tau_w = f(\tau_b \cdot \theta),$$

та беручи до уваги позитивні результати досліджень циклічної міцності [3], досліджено комплексний вплив гарячого та холодного пластичного деформування крученням на циклічну міцність. Поєднанням гарячого деформування аустеніту в процесі *ВТМЗ* з деформуванням сталі після мартенситних перетворень (*ДСМ*) отримано разом з високою міцністю підвищений опір пружним деформаціям.

Зміна комплексу механічних властивостей сталі в результаті деформаційного старіння залежить від таких основних факторів:

структурного стану мартенситу, створеного попереднім термічним чи термомеханічним обробленням;

- режимів попереднього відпуску;
- параметрів пластичного деформування;
- способу деформування;
- ступеня деформації;
- температури кінцевого відпуску.

Відпрацьовані деформаційно-термічні режими *ВТМЗ* і технології оброблювання торсійних валів показали її високу ефективність порівняно зі звичайним гартуванням (*ЗТО*). Як спосіб холодного поверхневого деформаційного зміцнення натурних валів використали поздовжнє посекторне розкочування профільними роликками.

Результати досліджень на натурних деталях. Встановлено, що холодне деформування після *ВТМЗ* доцільно застосовувати з мінімально можливим ступенем деформування ($\lambda = 0,4 - 0,6$ %) для досягнення достатнього запасу пластичних властивостей, забезпечуючи тим самим необхідну довговічність з одночасним підвищенням робочих напружень. Збільшення λ понад вказані значення призводить до стабілізації властивостей і значного окрихчення матеріалу.

Досліджуючи причини зміцнення мартенситу в результаті деформаційного старіння, деякі автори пояснюють, що зміцнення настає, з одного боку, внаслідок деформаційного нагартування, а з іншого, у зв'язку з певним перерозподілом вуглецю під час відпуску деформованого мартенситу внаслідок підвищеної густини дислокацій.

Деформування, очевидно, спричиняє велику густину центрів зародження карбідних виділень і тим самим здрібнює карбідні частини. Про достовірність таких міркувань свідчать результати вимірювання питомого електроопору (таблиця).

Зміна питомого електроопору на переходах деформаційного старіння

№ з/п	Режим оброблення	питомий електроопір ρ (мком·см)
1	ВТМО, відпуск 200 °с	$34,1 \cdot 10^{-6}$
2	ВТМО, відпуск 200 °с, зміцнення розкочуванням ($\lambda = 45\%$)	$35,3 \cdot 10^{-6}$
3	ВТМО, відпуск 200 °с, зміцнення розкочуванням ($\lambda = 45\%$), відпуск 150 °с	$33,6 \cdot 10^{-6}$

Якщо в результаті деформування спостерігали деяке збільшення електроопору, то під час подальшого відпуску опір зменшується внаслідок розпаду твердого розчину, спричиненого взаємодією атомів вуглецю з дислокаціями та впорядкуванням твердого розчину.

Деформаційне старіння мартенситу ВТМЗ істотно підвищує характеристики опору малим пластичним деформаціям. Деформація $\lambda = 0,4 - 0,6\%$ і подальший відпуск 150 °С підвищують границю пропорційності з 880 до 1030 МПа, а границю текучості – з 1230 до 1360 МПа (рис. 2).

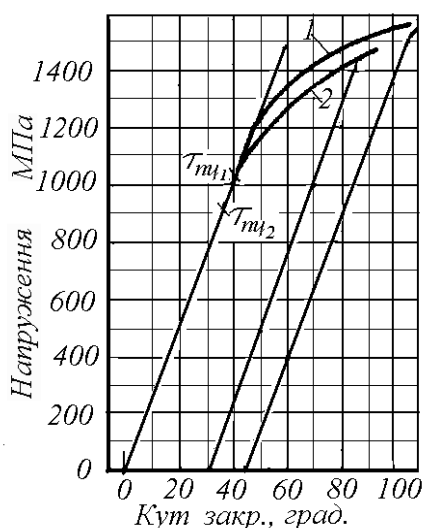


Рис. 2. Діаграма впливу ВТМЗ та нагартування на границю пропорційності

У випадку комбінованого зміцнення ВТМО і ДСМ за оптимальними режимами криві кручення (рис.2) торсійних валів мають свої особливості. Одночасно з підвищенням межі текучості треба визначити величину схильності до зміцнення як в області малих пластичних деформацій, так і вище межі текучості порівняно з валами після ВТМО. Наслідком вказаних змін є крутіший нахил кривих у пластичній області, що дало змогу, не змінюючи коефіцієнтів первинного заневолювання ($K_{зан}^I = 0,38 - 0,4$), отримати високі значення умовної межі пропорційності – 1460 – 1480 МПа (рис. 2).

Результати досліджень показали, що додатковим резервом підвищення пружних властивостей є застосування додаткового відпуску після операцій заневолювання чи обкочування [5].

Випробування схеми зміцнення

Із наведеного видно, що проведення після ВТМО деформаційного старіння мартенситу підвищує пружні властивості торсійних валів, зберігаючи пластичність на рівні і вище мартенситу об'ємного гартування. Це дає підставу сподіватися на заплановану довговічність валів в умовах циклічних випробувань.

Треба сказати, що комбіноване зміцнення *ВТМЗ* – *ДСМ* не усувало завершальних операцій зміцнення: заневолювання ($K_{зан}^I = 0,38 - 0,4$), обкочування роликами (зусилля на ролик досягало 1200 – 1400 н), заневолювання ($\kappa = 0,55 - 0,56$).

Циклічне випробування валів, зміцнених за оптимальними режимами *ВТМЗ* ($\theta = 65\%$, відпуск 200 °С) і *ДСМ* ($\lambda = 0,4 - 0,6\%$, відпуск 150 °С) підтвердили можливість отримання стабільної довговічності за підвищених рівнів максимальних напружень циклу $\tau_{max} = 1580 - 1600$ МПа і постійному значенні мінімального напруження τ_{min} . Середня довговічність торсійних валів знаходиться на рівні 330 000 циклів (розсіювання 185 – 440 000 циклів), що перевищує допустиму довговічність більше ніж удвічі.

На рис. 3 показано залежність довговічності торсійних валів від максимального навантаження за результатами їхнього випробування після *ВТМЗ* та різних схем зміцнення. За рахунок *ВТМО* крива довговічності зсувається вправо стосовно діаграми для *ЗТО*.

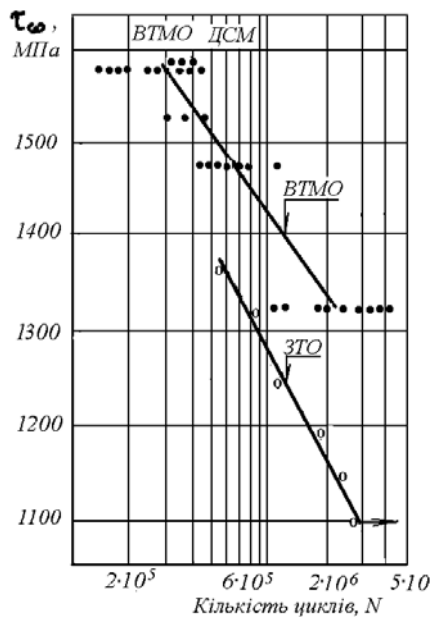
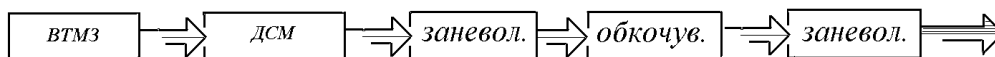


Рис. 3. Діаграма втомленості торсійних валів після комплексного зміцнення

Порівнянням обмеженої витривалості торсійних валів за однакових максимальних напружень циклу (1320 – 1380 МПа) доведено, що довговічність валів після *ВТМЗ* значно вища ніж після *ЗТО*. За максимальних напружень 1530 – 1600 МПа отримали надійну витривалість валів, тоді як вали, оброблені в режимі *ЗТО*, виявились непрацездатними внаслідок низьких значень границі пропорційності (1500 МПа) (рис.3).

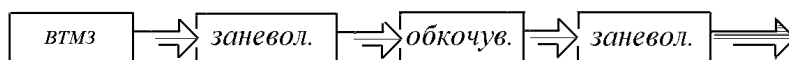
Отже, резерви конструктивної міцності, досягнуті за рахунок *ВТМО*, дали змогу розробити декілька принципово нових технологічних схем виготовлення торсійних валів поєднано з холодним комплексним зміцненням [5]:

1)



У цьому випадку підвищується рівень максимальних напружень (умовна межа пропорційності) з 1325 МПа до 1600 МПа для забезпечення вимог щодо довговічності і покращання умов підресорювання машин;

2)



за різними режимами.

У цьому випадку:

- підвищується довговічність валів більше ніж втричі за максимальних напружень циклу 1325 МПа;
- зберігається довговічність на рівні валів після ЗТО і ДСМ за максимальних напружень циклу $\tau_{\max} = 1460 - 1480$ МПа; відповідає операція посекторного розкочування та деформаційного старіння.

Висновки

1. Узагальнено досвід підвищення довговічності пружних деталей транспортних машин в умовах кручення шляхом комплексного застосування ВТМЗ, об'ємного та поверхневого пластичного деформування.

2. Холодне деформування після ВТМЗ доцільно застосовувати з мінімально можливим ступенем деформування ($\lambda = 0,4 - 0,6$ %) для досягнення достатнього запасу пластичних властивостей, забезпечуючи тим самим необхідну довговічність з одночасним підвищенням робочих напружень. збільшення λ понад вказані значення призводить до стабілізації властивостей і значного окрихчення матеріалу.

3. Деформаційне старіння мартенситу після ВТМЗ підвищує пружні властивості торсійних валів, зберігаючи пластичність на рівні і вище мартенситу об'ємного гартування.

1. Кукляк Н.Л., Романів О.Н. Об эффективности высокотемпературной термомеханической обработки среднелегированных сталей // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – №5. – с.51–57. 2. Кукляк М.Л., Гаврилов Г.В., Махоркін Є.М. Кручення як технологічний фактор зміцнення пружних деталей машин // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 535. – С.68–76. 3. Кукляк Н.Н., Романів О.Н., Черепанова Г.И., Астафьева Е.В., Цыпкина Е.Д. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства стали 45ХНМФА при кручении // Физико-химическая механика материалов, 1968. 4. Duckworth W.E., Metallurgia, 1964, 69, 412. 5. А.с. 513091 (СССР). Способ упрочнения изделий. О.Н. Романів, Н.Л. Кукляк, И.С. Сорокинский и др. Б.И. 1976, №17.