

У зв'язку з вищенаведеним встановлено, що основною причиною збурень швидкості пасової передачі, викликаною гнучким зв'язком, є його різнотовщинність, позбутися якої можна підвищенням точності виготовлення пасика. Іншою причиною неоднорідності властивостей ланок гнучкого зв'язку є їх розтяг внаслідок прояву повзучості матеріалу пасика (під час тривалої перерви в роботі), що проявляється на вільних ділянках і в той самий час блокується силами тертя на ділянках охоплення шківів. Тому необхідно приділяти особливу увагу якості матеріалу, яка позначається на його реологічних властивостях. Щодо існуючих моделей аудіоапаратури, для запобігання "плаванню" звуку можна рекомендувати розвантаження (зняття) пасика на час тривалої перерви в роботі механізму.

1. *Справочник по технике магнитной записи / Под ред. О.В. Порицкого, Е.Н. Травникова. – К.: Техніка, 1981. – 319 с.* 2. *Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач. – М.: Машиностроение, 1982. – 263 с.*

УДК 621.789.+272.5

М.Л. Кукляк, Г.В. Гаврилов, Є.М. Махоркін  
Національний університет Львівська політехніка"  
кафедра технології машинобудування

## **КРУЧЕННЯ ЯК ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЧИННИК ЗМІЦНЕННЯ ПРУЖНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

© Кукляк М.Л., Гаврилов Г.В., Махоркін Є.М., 2005

**Узагальнено закономірності зміцнення деталей машин, які працюють в умовах циклічного навантаження крученням. Кручення як вид навантаження знаходить своє застосування як дієвий спосіб підвищення довговічності торсіонів шляхом холодного нагартування в поєднанні з обкочуванням і деформаційним старінням.**

**Conformities to the law of strengthening details of machines that work in the conditions of the cyclic loading to twisting are generalized. Twisting, as a type of loading, finds its application as an effective method of rise of longevity of torsion by cold hardening in combination with rolling and by the deformation senescence.**

Найпоширенішим видом навантаження деталей є змінні за величиною та знаком навантаження, які призводять до руйнування. Характерно, що під дією повторнозмінних напружень воно може відбуватись за напружень, менших від границі плинності за умови, коли:

- навантаження одного знака періодично змінювати від нульового до максимального;
- багатократне повторення навантаження періодично змінюється не тільки за модулем, а й за знаком (знакозмінні навантаження);
- на опір втомлюваності матеріалу одночасно впливають як повторюваність, так і змінність навантаження.

За таких обставин зміну навантаження розрізняють за симетричним та асиметричним циклами (рис. 1).

Розлам деталі від втомлюваності має майже завжди характерний вигляд з двома зонами – гладкою притертою та великозернистим доламом. За повторно змінних навантажень безумовним є процес, що має різко виражений характер. Із двох видів напружень – нормальних та дотичних – вирішальний вплив на процеси втомлюваності до утворення першої тріщини без винятку мають дотичні напруження, які спричиняють пластичні зсуви та руйнування.

Границя витривалості залежить від форми та розмірів деталі, способу її оброблення, стану поверхні деталі, виду напруженого стану, закону зміни навантаження в процесі випробування чи

експлуатації. Усі ці супутні чинники необхідно враховувати під час проектування, виготовлення та зміцнення деталей. Навантаженню крученням піддаються переважно циліндричні деталі – вали круглого профілю.

Відомо, що стрижень, з якого виготовлено гвинтову пружину і який працює в умовах її розтягу чи стиску поздовжніми силами, сприймає переважно навантаження крученням. Тут напруження від зсуву і згину відіграють другорядне значення. Це стосується як статичного, так і динамічного навантаження. Останні з них здебільшого протікають внаслідок різкої зміни навантаження, що межує з ударами, коливаннями та появою резонансу.

Під дією зовнішніх навантажень у кожній точці тіла виникає різна за величиною інтенсивність внутрішніх сил, тобто різний напружений стан, який характеризується сукупністю всіх векторів напружень, що діють на площинках разом з точкою, що розглядається.

Серед найважливіших показників якості виготовлення важко навантажених деталей є вимоги до міцності та довговічності. Втрата працездатності деталей машин частіше настає внаслідок недостатньої міцності.

Для забезпечення безвідмовної роботи необхідно точно конкретизувати характеристики механічних властивостей матеріалу в небезпечних місцях деталей, які залежать від технологічних чинників, що впливають на зміну фізико-механічних параметрів матеріалу взагалі чи конкретної деталі зокрема.

З огляду на створення бажаної структури найважливішими технологічними параметрами є: температурні – параметри аустенізації, гартування, формоутворення, відпуску, деформаційного старіння, випробувань. Серед інших важливих технологічних чинників є величина і напрямком деформування, текстуроутворення (рис. 2), які залежать від хімічного складу, зокрема, від кількості вуглецю, характеру легування [1].

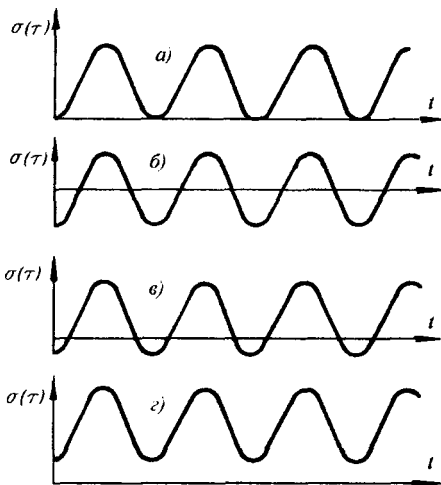


Рис. 1. Багаторазове (циклічне) навантаження:  
а, г – одного знака; б – симетричний;  
в – несиметричний цикли

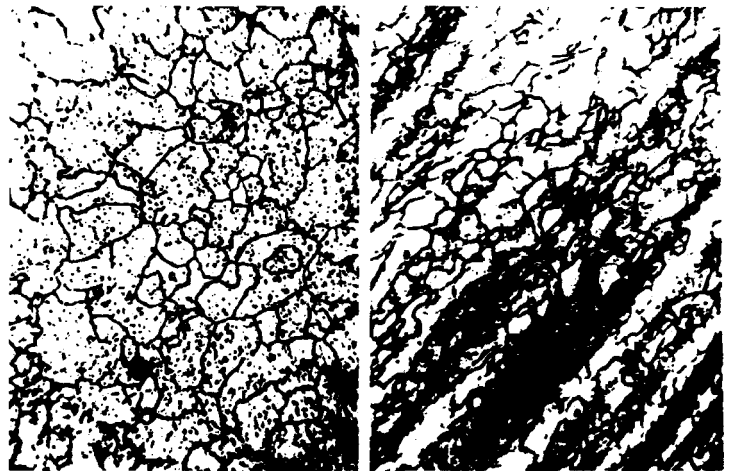


Рис. 2. Границі колишніх аустенітних зерен та строката структура сталі 45XHMFA (травлення насиченим розчином пікринової кислоти, х350);  
а – після звичайного гартування; б – після ВТМЗ

Хімічний склад матеріалу, його структура, умови технологічного формоутворення деталі, різний напружений стан під час експлуатації не дають однозначної відповіді на поставлені вимоги.

Очевидно потрібно враховувати вид деформації деталі (металу) як в процесі термомеханічного зміцнення (ТМЗ, рис. 2), так і її відповідність зовнішнім експлуатаційним навантаженням, чи відповідність між напрямком деформування в процесі оброблювання та напрямком навантаження під час подальших механічних випробувань чи експлуатації [2].

Як вид гарячого деформування під час високотемпературного термомеханічного зміцнення (ВТМЗ, відносно гаряче деформування  $\theta = 1,6-0,8$ ) та деформування під час об'ємного холодного нагартовування (коефіцієнт заневолювання  $0,2 \leq K < 1$ ) вибрали кручення як таке, що відповідає силовим умовам експлуатації торсіонів.

Розглянемо стрижень круглого перерізу з радіусом  $r$  і довжиною  $l$  з прикладеними зовнішніми силами (рис. 3). Один кінець стрижня закріплено нерухомо, а інший закручений моментом  $M$  на кут  $\theta$ . У цьому випадку задача інженерного розрахунку полягає у визначенні напружень, що виникають у тілі вала, у встановленні його перерізу та необхідного матеріалу, які забезпечать потрібну міцність для заданих умов експлуатації.

В умовах кручення дотичні напруження визначають за формулами [3]

$$\tau_{xy} = 0, \quad \tau_{xz} = -Gcy, \quad \tau_{yz} = Gcx. \quad (1)$$

Такі напруження зустрічаються не тільки в площині поперечного перерізу, а й в площині будь-якого меридіонального перерізу стрижня.

За складовими напружень (1) знаходимо дотичне напруження, яке діє на будь-якій площинці поперечного перерізу, перпендикулярному до осі стрижня

$$\tau = Gcr, \quad (2)$$

де  $r$  – відстань центра розглядуваної площинки від осі стрижня (рис. 3).

Не важко переконатись, що  $\tau$  спрямовано перпендикулярно до радіуса  $r$ . Момент дотичних напружень відносно осі стрижня дорівнює

$$M = \int_F \tau r dF = \int_0^r Gcr \tau 2\pi r dr = \frac{\pi r^4 Gc}{2}, \quad (3)$$

де  $dF = 2\pi \cdot r \cdot dr$ .

Максимального значення дотичне напруження досягає на боковій поверхні стрижня

$$\tau = Gcr = \frac{2M}{\pi r^3}. \quad (4)$$

Кут закручування кінця стрижня визначається за співвідношенням

$$\theta = cl = \frac{2M \cdot l}{\pi r^4 \cdot G}. \quad (5)$$

Залежності (2)–(5) покладено в основу зміцнення деталей з поперечним коловим перерізом, які працюють в умовах кручення.

У процесі навантаження зразків крученням встановлюється відповідний зв'язок між напруженнями кручення  $\tau$  та деформацією  $\gamma$ . Типова крива навантаження показана на рис. 4. Перша ділянка кривої відповідає лінійній залежності, причому

$$\operatorname{tga} = \frac{d\tau}{d\gamma} = G, \quad (6)$$

де  $G$  – модуль пружності матеріалу  $G$ .

Далі утворюються не тільки пружні, а й пластичні (залишкові) деформації за напруження, що дорівнює межі плинності матеріалу  $\tau_m$  і становить 0,2 %. Рівняння деформування можна записати у такому вигляді:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} + 0,002 \left( \frac{\tau}{\tau_m} \right)^n,$$

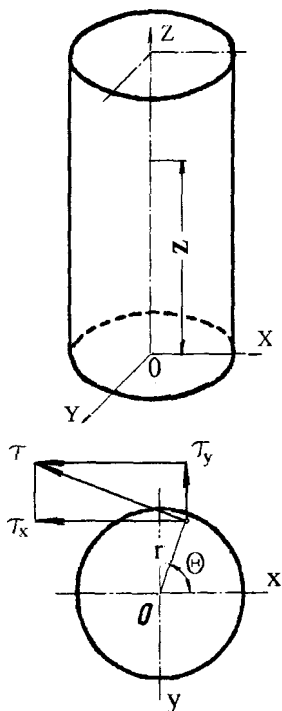


Рис. 3. До визначення дотичних напружень

де  $n$  визначається з умови, що крива проходить через точку, що відповідає границі міцності матеріалу  $\tau_b$ .

Для розрахунків можна використати схематизовані криві деформування, показані на рис. 5.

Діаграма без зміцнення (рис. 5, а) придатна для описання порівняно невеликих пластичних деформацій матеріалів, що мають площинку плинності (наприклад, для маловуглецевих сталей).

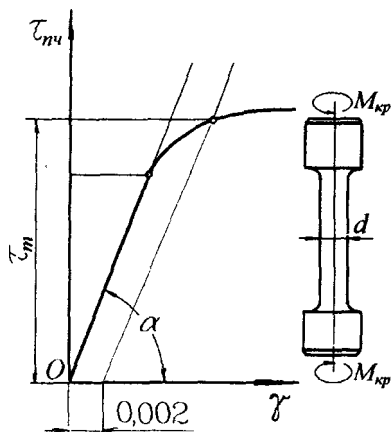


Рис. 4. Діаграма деформування циліндричного вала крученням

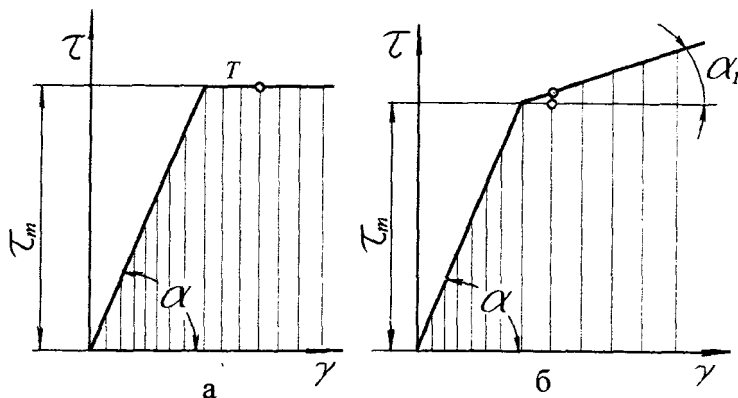


Рис. 5. Схематизовані діаграми деформування:  
а – діаграма матеріалу без зміцнення;  
б – діаграма для матеріалу з лінійним зміцненням

Діаграма з лінійним зміцненням дає краще наближення до дійсної кривої деформування. На другій ділянці цієї кривої

$$\frac{d\tau}{d\theta} = \operatorname{tg} \alpha_1 = G_1.$$

Модуль зміцнення  $G_1$  значно менший від модуля пружності. Переважно  $G_1 = (0,01-0,05)G$ . Для багатьох конструкційних матеріалів (зокрема, для сталей) криві деформування мають однаковий вигляд (в області пластичних деформацій  $\epsilon < 5\%$ ).

**Заневолювання зразків.** Заневолювали зразки холодним деформуванням в умовах кручення з використанням ручного навантаження. Зміцнені зразки за допомогою ВТМЗ крученням під час заневолювання закручували в тому самому напрямку, в якому їх деформували під час термо-механічного зміцнення, тобто в тому, що й прикладений середній робочий крутний момент в умовах пульсивного навантаження [4]. Отже, під час роботи підтримували режим прямого навантаження на відміну від зворотного, коли деформація оброблювання та деформація, зумовлена робочими напруженнями, за напрямком не збігаються. Величину кута закручування зразка під час заневолювання визначали за співвідношенням

$$K = \varphi_{\text{пр}} / \varphi_{\text{зан}},$$

де  $\varphi_{\text{пр}}$  – кут закручування, що відповідає границі пропорційності;  $K$  – коефіцієнт заневолювання;  $\varphi_{\text{зан}}$  – кут закручування зразка під час заневолювання. Беручи до уваги нестабільність границі пружності, досягнутої за одне навантаження, для заневолювання застосовували п'ятикратне тренування з кутом деформування  $\varphi_{\text{деф}}$ , що дорівнює значенню кута розвантаження під час першого циклу. У результаті досягали стабільного значення границі пружності, як у першому навантаженні. На рис. 6 показані діаграми зміни границі пропорційності в умовах кручення зразків із сталі 45ХНМФА за різних режимів зміцнення, а на рис. 6 – її зміну залежно від коефіцієнта заневолювання [5].

Для виробів, виготовлених із низьковідпущених сталей, холодне заневолювання набуває додаткового змісту як основна операція зміцнення. Після холодного крізного деформування в таких сталях відбуваються додаткові субструктурні перетворення, пов'язані з перерозподілом вуглецю в твердому розчині та карбідній фазі.

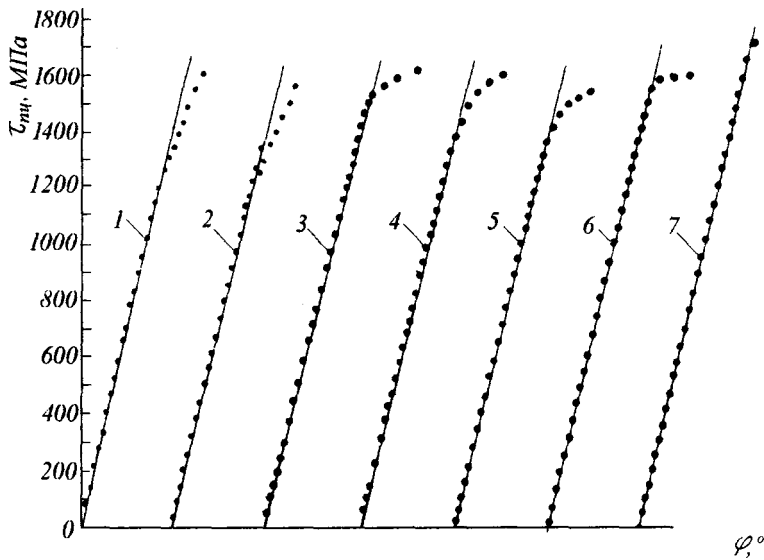


Рис. 6. Зміна границі пропорційності сталі 45ХНМФА залежно від режимів технологічного процесу зміцнення:

- 1 – ТЗ, відпуск 200 °С; 2 – ВТМЗ, відпуск 200 °С; 3 – ВТМЗ, відпуск 200 °С + 3 ( $K = 0,7$ );  
 4 – ВТМЗ, відпуск 200 °С + 3 ( $K = 0,7$ ) + О; 5 – ВТМЗ, відпуск 200 °С + 3 ( $K = 0,7$ ) + О + ДСМ (200 °С);  
 6 – ВТМЗ, відпуск 200 °С + 3 ( $K = 0,7$ ) + О + ДСМ (200 °С) + 3 ( $K = 0,7$ );  
 7 – ВТМЗ, відпуск 200 °С + 3 ( $K = 0,7$ ) + ДСМ (200 °С)\*

\*Тут і далі в позначеннях: ТЗ – термічне зміцнення – гартування; ВТМЗ – високотемпературне термо-механічне зміцнення (в аустенітному стані); 3 ( $K = 0,7$ ) – заневолювання крученням за значенням коефіцієнта заневолювання  $K = 0,7$ ; О – обкочування роликми; ДСМ – деформаційне старіння низьковідпущеного мартенситу; символ «+» (плюс) – послідовне використання декількох операцій в порядку їх виконання.

З рис. 7 зрозуміло, що процес заневолювання істотно підвищує пружні властивості матеріалу та впливає на рівень робочих напружень торсійних валів [4, 5].

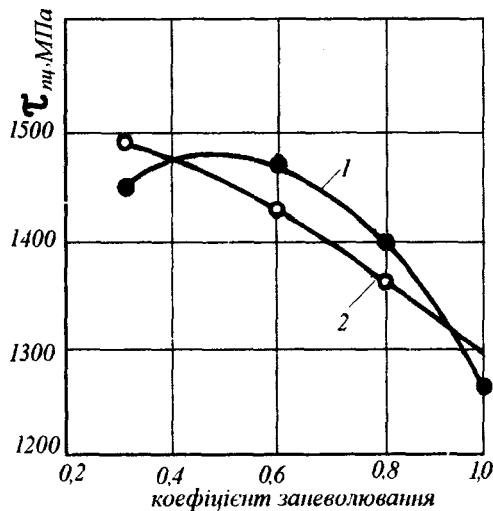


Рис. 7. Вплив величини заневолювання на границю пропорційності:

- 1 – ТЗ (гартування, відпуск 200 °С); 2 – ВТМЗ [5]

На рис. 8 показано деякі пошукові схеми технологічних процесів підвищення циклічної міцності шляхом застосування об'ємного орієнтованого кручення – заневолювання – та поверхневого обкочування роликми. Залежно від послідовності їх виконання обидві операції неоднозначно впливають на циклічну міцність. Аналіз технологічних процесів за схемами 1 і 2 із застосуванням

процесів ВТМЗ зі ступенем зсувової деформації ( $\theta = 0,86$ ), відпуск  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , заневольвання ( $K = 0,4$ ) та обкочування ( $\sigma = 650\text{ МПа}$ ) (рис. 8, 9) показує, що зміна порядку холодного зміцнення різко знижує границю втомленості сталі внаслідок порушення під час заневольвання системи сприятливих залишкових напружень стискування, сформованих в процесі обкочування.

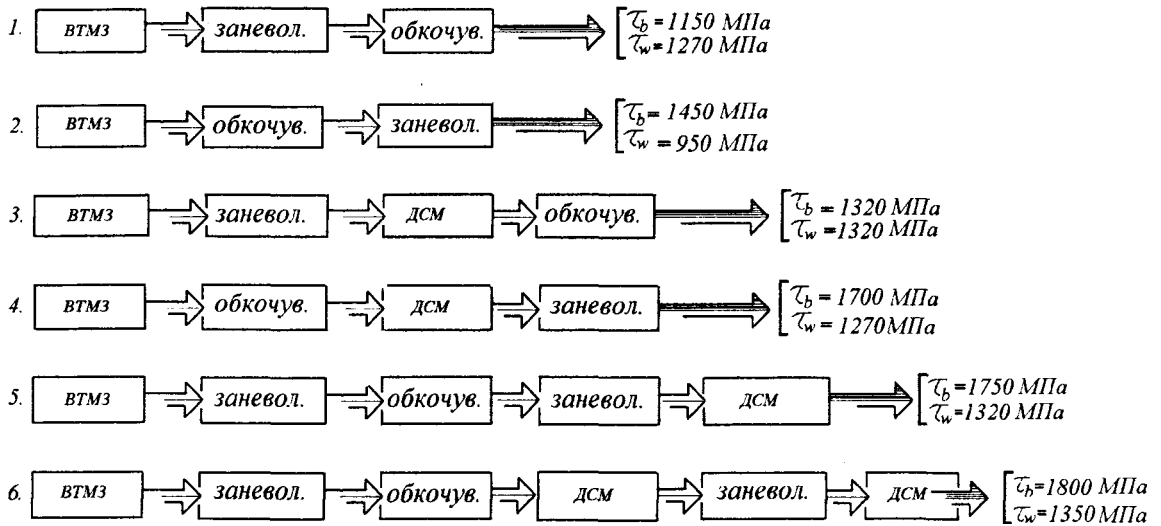


Рис. 8. Деякі пошукові схеми технологічних процесів підвищення статичної та циклічної міцності на лабораторних зразках із сталі 45ХНМФА

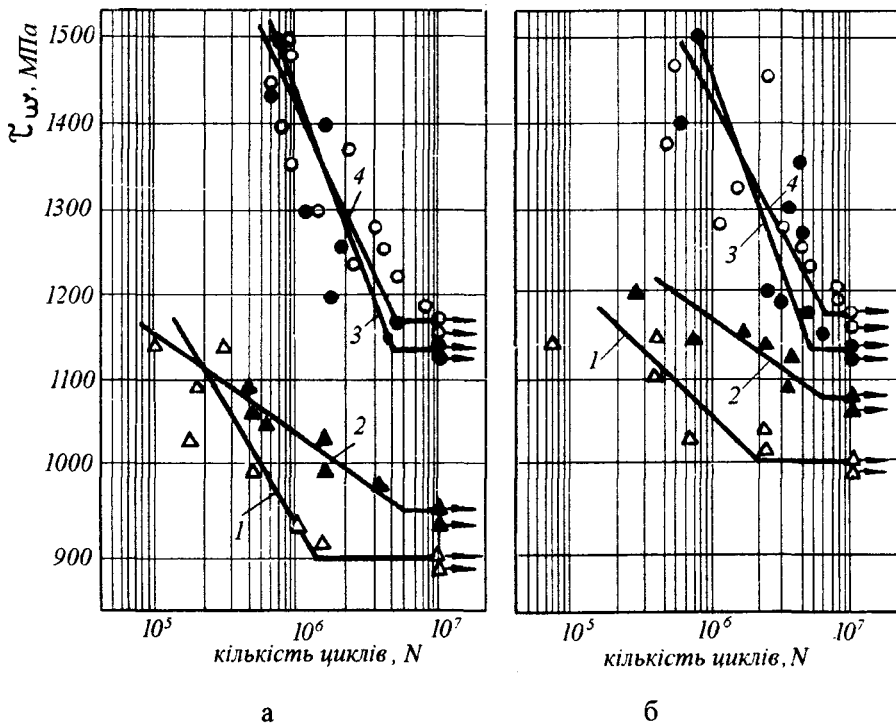


Рис. 9. Діаграми втомленості сталі 45ХНМФА, зміцненої за схемами:  
 а – гартування; б – ВТМЗ ( $\theta = 1,6$ ); 1 – гартування (ВТМЗ); 2 – гартування (ВТМЗ) + 3 ( $K = 0,4$ );  
 3 – гартування (ВТМЗ) + О; 4 – гартування (ВТМЗ) + 3 ( $K = 0,4$ ) + О

Основним чинником, який визначає процес зміцнення, є величина пластичної деформації, яка повертає площини ковзання, гальмує блокування кристалів, спотворює атомну ґратку за одночасного збільшення в ній напружень 1-го та 3-го роду. Поряд з нагартуванням пластичне

деформування сприяє виникненню залишкових макронапружень, які помітно впливають на міцність сталі. Оскільки залишкові напруження часто виступають як обов'язковий супутник пластичної деформації і тим більше поверхневої деформації деталей та виробів, важко розділити вплив власне нагартування та залишкових напружень на втомлюваність сталі.

Методи холодного зміцнення застосовували ще в першій половині минулого століття для оброблювання сталей з рівноважною структурою. Проте останнім часом значного розвитку набуло зміцнення виробів в структурно нерівноважному стані після гартування та низького відпуску (ДСМ). Незважаючи на значну кількість праць щодо впливу нагартування на циклічну міцність сталевих виробів і деталей, в літературі немає інформації про вплив *комбінованих методів* пластичного деформування на опір втомлюваності деталей машин. Мова йде про цілком технологічно виправдане поєднання в зміцнювальному процесі декількох операцій холодного нагартування, наприклад, заневолювання крученням, обкочування чи розтягування та кулькоструменевого нагартування. Такий комбінований технологічний процес є доцільним для одночасного підвищення показників пружності та опору втомленості. Крім того, немає інформації щодо впливу поєднаних операцій холодного деформування на кінцеве формування системи залишкових напружень, анізотропії циклічної міцності тощо.

На рис. 10 показано результати експериментальних досліджень впливу зміни послідовності виконання операцій холодного нагартування – заневолювання, обкочування – деформаційного старіння.

Поверхнєве зміцнення низьковідпущеної загартованої сталі належить до ефективних методів підвищення циклічної міцності. Такий процес забезпечує істотне зміцнення за рахунок високих залишкових стискувальних напружень у приповерхневих шарах (рис. 9).

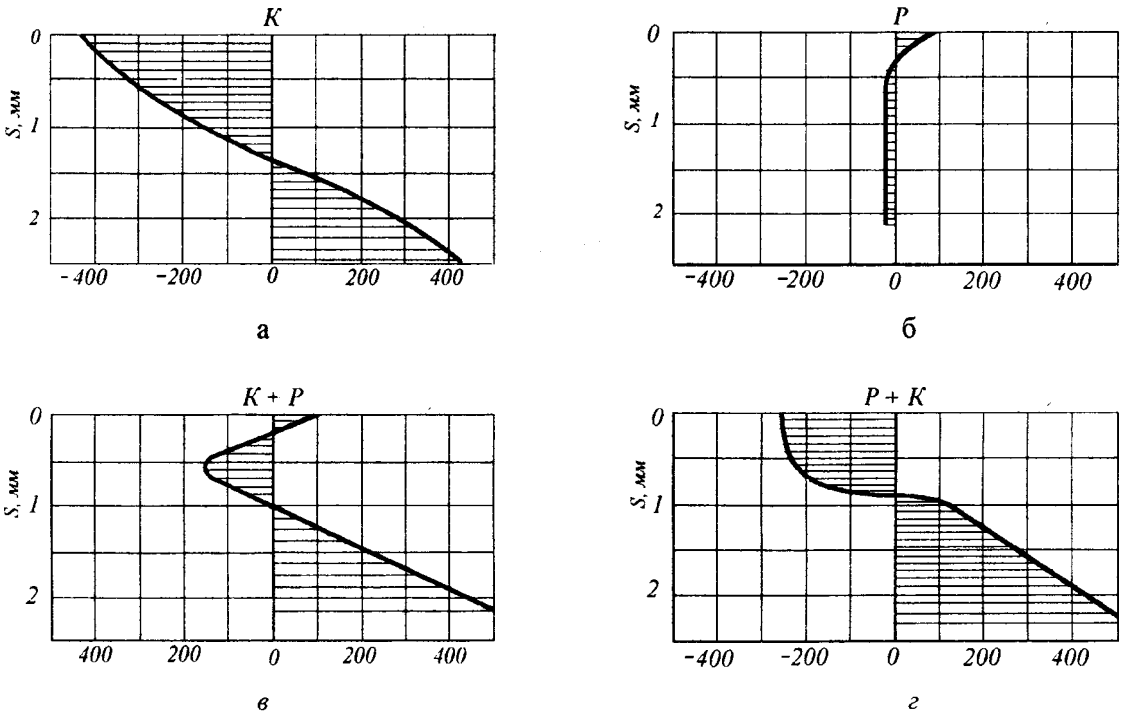


Рис. 10. Епюри розподілу дотичних напружень у приповерхневих шарах після:  
 а – заневолювання (K); б – обкочування (P); в – заневолювання + обкочування (K+P);  
 г – обкочування + заневолювання (P+K) [6]

Утворення залишкових напружень під час різних технологічних операцій перебігає в різний спосіб. В основі їх виникнення лежать переважно незворотні термодинамічні процеси – об'ємні зміни в матеріалі. Найтипівішим з процесів є виникнення залишкових напружень в результаті попереднього пластичного деформування крученням.

Окремо взяті операції холодного нагартування сприяють підвищенню границь пропорційності та втомлюваності, що пов'язано з виникненням у зразках (деталях) системи макронапружень (рис. 10).

Разом з тим поєднання в одному технологічному процесі заневолювання і обкочування істотно змінює характеристики пружності та втомленості. Це безперечно значною мірою зумовлено перерозподілом і в окремих випадках анігіляцією цих напружень.

Для оцінки впливу залишкових напружень на міцність і деформації деталей враховується дія макроскопічних напружень. Утворення залишкових напружень в процесі різних технологічних процесів перебігає різним шляхом. В основу їх виникнення покладено переважно незворотні об'ємні зміни в матеріалі. Найтипівішим з процесів є виникнення залишкових напружень в результаті попереднього пластичного деформування.

Беручи до уваги ту обставину, що для пружних елементів бажаним є високий рівень границі пропорційності ( $\tau_{\text{мц}} \geq 1500 \text{ МПа}$ ), то пошук інших схем зміцнення зосередили на деформаційному старінні, вплив якого на границю пружності і пропорційності зумовлений безпосередньо субструктурними змінами в сталі, але не температурними чинниками, здатними змінити чи усунути систему залишкових напружень.

Аналіз технологічних процесів за схемами 4–6 (рис. 8) показує, що післядеформаційний відпуск мартенситу істотно підвищує пружні властивості сталей, який охоплює деформацію та подальше старіння за температур, що не перевищують температур відпуску після гартування. Для ефективного зміцнення деформаційним старінням потрібен певний комплекс властивостей вихідного мартенситу сталі: висока схильність до зміцнення холодним деформуванням, достатній запас пластичності. Ці властивості притаманні сталям 45ХНМФА, 45ХН2МФА-Ш із структурою низьковідпущеного мартенситу.

Зміна властивостей у процесі деформаційного старіння мартенситу є результатом сумарного впливу деформації та післядеформаційного відпуску. Тому важливим є уміння розділити внесені в ефект зміцнення мартенситу процеси, що перебігають під час деформації перед відпуском і старіння під час післядеформаційного нагрівання.

Проміжний відпуск після заневолювання підвищує границі пропорційності та втомленості. Якщо проміжний відпуск здійснити після операції обкочування, коли фінішною операцією є заневолювання, то спостерігається значне підвищення границі пропорційності та границі втомленості.

Ще вищі значення властивостей міцності отримано після подвійного відпуску зразків, що пройшли аналогічне зміцнення. Найвищого рівня пружних властивостей ( $\tau_{\text{мц}} = 1750 \text{ МПа}$ , режим 7) вдалось досягнути під час оброблювання з подвійним заневолюванням, коли повторне заневолювання здійснювали після обкочування перед фінішним відпуском (ДСМ). Такий процес зміцнення заслуговує на увагу, оскільки, як зрозуміло з результатів, він поряд з отриманням високих пружних властивостей забезпечує також високу втомлювальну міцність. Зміну  $\tau_{\text{мц}}$  дослідили в процесі оброблювання за іншими схемами зміцнення, які в структурі процесу мали проміжні відпуски (ДСМ, див. таблицю).

Аналіз наведених результатів досліджень показує:

- якщо ДСМ (200 °С) виконувати після заневолювання, але до обкочування, то границя пропорційності знаходиться на низькому рівні, практично однаковому, як і для зразків без додаткового відпуску (режим 1);
- “друге” ДСМ, виконане після обкочування, не впливає помітно на границю пропорційності (режим 8).

Заслуговує на увагу вивчення пружних властивостей після зміцнення з дробленим заневоленням і проміжним ДСМ (оброблювання за схемою МТО (механо-термічне зміцнення, режим 2)). Цей процес забезпечує високий рівень циклічної міцності сталі. Проте  $\tau_{\text{мц}}$  не досягає істотно високих значень, оскільки фінішна операція обкочування знижує рівень пропорційності попередніми циклами заневолювання.



**Пошукові схеми технологічних процесів зміцнення  
з проміжними відпусками (деформаційним старінням мартенситу – ДСМ)**

№ з/п	Режими зміцнення	$\tau_{\text{пц}}$ МПа	$\tau_w$ МПа
1	ВТМО + З( $K = 0,55$ ) + ДСМ (200 °С) + О	1310	1320
2	ВТМО+ 3-кратне З( $K = 0,68$ ) + ДСМ (200 °С) + О	1560	1320
3	ВТМО+ З( $K = 0,6$ ) + О +З( $K = 0,7$ ) + ДСМ (200 °С)	1640	1290
4	ВТМО+ З( $K = 0,7$ ) + О + ДСМ (200 °С) +З( $K = 0,7$ ) + ДСМ (200 °С)	1740	1330
5	ВТМО+ З( $K = 0,7$ ) +ДСМ (200 °С) + О+ДСМ (200 °С) + З( $K = 0,7$ ) + ДСМ (200 °С)	1750	–
6	ВТМО+ О + ДСМ (200 °С) +З( $K = 0,6$ ) + ДСМ (200 °С)	1720	1280
7	ВТМО+ З( $K = 0,7$ ) + О +ДСМ (200 °С) + З( $K = 0,7$ ) +ДСМ (200 °С)	1570	–
8	ВТМО+ З( $K = 0,7$ ) +ДСМ (200 °С) + О+ДСМ (200 °С)	1370	1270

Виявлено, що повторне помірне заневолювання після обкочування в поєднанні з проміжними відпусками забезпечує високий рівень границі пропорційності –  $\tau_{\text{пц}} \geq 1720$  МПа (режими 3–6). Операція холодного обкочування, що виконується безпосередньо після заневолювання, різко знижує рівень границі пропорційності, досягнутий заневолюванням, до значень, нижчих від границі витривалості. Тому необхідно знайти таке поєднання заневолювання, обкочування та відпуску, які б забезпечили максимально високе значення  $\tau_w$  за високого  $\tau_{\text{пц}}$ .

На основі результатів випробувань зразків, що пройшли комплексне зміцнення за різними схемами, можна встановити наявність певних кореляційних залежностей між рівнем пружних і втомлювальних властивостей досліджуваної сталі. Цим залежностям не підпорядковуються схеми зміцнень, в яких остаточною операцією є інтенсивне заневолювання ( $K = 0,5$ ).

**Висновки.** Узагальнено комплексний вплив технологічних параметрів зміцнення торсійних валів. Заневолювання як орієнтовне нагартовування крученням супроводжується неоднорідною пластичною деформацією від осі до зовнішнього діаметра зразка, що призводить до виникнення системи залишкових тангенційних напружень. Приріст границь пропорційності та втомленості у разі прикладення «прямого» навантаження можна інтерпретувати як сумарний ефект від віднімання залишкових тангенційних напружень нагартовування від напружень зовнішнього впливу. Заневолювання сталі із структурою відпущеного мартенситу сприяє утворенню значних дотичних напружень, які за своїм знаком спрямовані в протилежний бік щодо робочих напружень.

1 Романів О.М., Кукляк М.Л. Про зв'язок ефективної температури відпуску після термо-механічної обробки з особливостями процесу руйнування сталі / Доп. АН УРСР. – 1967. – № 10. – Сер. А. 2. Кукляк М.Л. Системний підхід до технологічних операцій зміцнення валів // Вісн. Нац. ун-ту. “Львівська політехніка”. – 2001. – № 422. – С. 17–23. 3. Динник А.Н. Продольный изгиб. Кручение. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 392 с. 4. Кукляк М.Л. Методи підвищення довговічності пружних деталей машин. – Львів: Світ, 1997. – 206 с. 5. Кукляк Н.Н., Романів О.Н., Черепанова Г.И., Астафьева Е.В., Ципкина Е.Д. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства стали 45ХНМФА при кручении // Физико-химическая механика материалов. – 1968. – № 2. 6. Кукляк М.Л., Гаврилов Г.В. Залишкові напруження в сталевих деталях, зміцнених за комплексною технологією // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 442. – С. 102–108.