

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РОЗМІРНОГО ФОРМОТВОРЕННЯ ТА ЗМІЦНЮВАННЯ

УДК 621.002.5-19

М.Л. Кукляк, А.М. Кук

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН

© Кукляк М.Л., Кук А.М., 2001

Is shown, that the necessary level of machines reliability in conditions of cyclic loading can be reached by increase of the materials durability characteristics with the mechanical, thermal, thermomechanical and other kinds of complex hardening. For creation of appropriate resistance to this loading it is necessary to ensure the high borders of proportionality and weariness.

Розрахований рівень надійності, закладений в машину на стадії проектування, повинен бути забезпечений під час виготовлення деталей і елементів, складання і регулювання машин. Трапляються випадки, коли технологічний процес виготовлення виробів не забезпечує заданого рівня надійності машин, через що втрачається потрібне конструкторське рішення.

Зниження рівня надійності машин на стадії виробництва може бути наслідком однієї з таких причин:

- 1) деталі виготовлені з матеріалів, що мають дефекти, чи з матеріалів, що не забезпечують закладену міцність;
- 2) прийнятий технологічний процес виготовлення деталей та їх поверхневого оброблення не може забезпечити закладений рівень експлуатаційних властивостей;
- 3) у технологічному процесі виготовлення деталей допущені відхилення внаслідок недосконалої організації виробництва, недостатньої кваліфікації робітників;
- 4) під час виготовлення деталей використано несправне чи застаріле устаткування.

Для суттєвого підвищення надійності машин необхідно провести комплекс заходів, що охоплюють сферу проектування, виробництва і експлуатації.

Заходи щодо забезпечення надійності машин під час виробництва можна об'єднати в такі групи:

- 1) ретельний підбір матеріалів деталей згідно з вимогами технічної документації та контроль їх якості для своєчасного виявлення скритих дефектів чи не відповідності фізико-механічних властивостей поставленим вимогам;
- 2) чітке дотримання та вдосконалення технології виробництва.
- 3) підвищення вимог до точності й форми основних розмірів деталей і до якості їх поверхонь;
- 4) застосування автоматизованого устаткування, верстатів з ЧПК, що забезпечують високу точність та стабільність характеристик якості виробів, для виготовлення деталей машин;
- 5) вхідний, поточний та вихідний контролі якості виготовлення деталей, введення системи бездефектного виготовлення продукції.

Значного рівня надійності машин можна досягнути за рахунок підвищення характеристик міцності матеріалів за допомогою механічного, термічного, термомеханічного та інших видів комплексних зміцнень.

Забезпечення високих геометричних характеристик якості поверхні можна досягнути зрізанням нерівностей поверхні тонким шліфуванням, хонінгуванням, поліруванням, зняттям нерівностей поверхневим пластичним деформуванням під час обкатування, розкатування, дорнування, алмазного вигладжування та віброобкатування алмазними чи твердосплавними наконечниками .

Чистове оброблення методом пластичного деформування забезпечує високу якість обробленої поверхні та дозволяє уникнути появи концентраторів напружень. Зміцнення поверхневого шару металу під час пластичного деформування підвищує поверхневу твердість, границю текучості та пружності, сприяє виникненню залишкових напружень стискування, збільшення площі контакту поверхонь внаслідок зменшення мікронерівностей.

Із всіх типів пружних елементів підвісок транспортних машин найпростішими за конструкцією та надійнішим з огляду експлуатації є торсійні вали, чим і пояснюється підвищене до них зацікавлення.

Торсійні вали, переважно, працюють в умовах високих пульсивних навантажень крученням. Тому для створення належного опору цим навантаженням вони повинні мати високе значення границі пропорційності та границі втомленості.

Додаткового підвищення опору малим пластичним деформаціям торсійних валів можна досягнути за рахунок орієнтованого нагартування (заневолювання), а потрібної довговічності τ_w – методом поверхневого пластичного обкатування роликками.

Проте підвищення міцності зазначеною технологією призводить до зниження параметрів в'язкості руйнування матеріалів. Це стає небезпечним для деталей машин, що працюють в умовах циклічного навантаження, коли поряд з високим опором малим пластичним деформаціям необхідно мати високі показники довговічності.

Високих значень властивостей міцності та збереження за цих умов високої пластичності досягають зараз використанням багатьох різновидів термомеханічного оброблювання, і, зокрема, високотемпературного термомеханічного зміцнення [1, 2].

Сприятливий вплив ВТМО на механічні властивості ряду сталей, що проявляється, передусім, в підвищенні їх пластичності, створює передумови для використання цього процесу з метою збільшення циклічної міцності.

Технологічне зміцнення деталей пластичним деформуванням

ВТМО з використанням деформування крученням створює передумови для вирішення проблеми комплексного покращання властивостей: міцності й пластичності, опору руйнуванню втомленістю, в'язкості руйнування, ударної витривалості та опору поширенню тріщин.

Вибрати оптимальну технологічну схему ВТМО для конкретних виробів неможливо без всебічних досліджень, пов'язаних з відпрацюванням деформаційно-термічних режимів зміцнення, застосування нових методів і їх поєднання з процесами холодного нагартування.

Приповерхневі металеві шари завдяки специфіці свого розташування на межі двох фаз – “метал – доквілля” – мають нижчий опір втомленості, ніж матеріал серцевини виробу. Кристали, що прилягають до поверхні, знаходяться в сприятливіших умовах щодо деформування, оскільки мають “сусідів” лише з одного боку. Метал в поверхневому шарі слабше

опирається деформуванню і починає текти раніше ніж всередині зразка. Тоді в поверхневих шарах виникають залишкові напруження, які за знаком протилежні напруженням від зовнішніх навантажень. У свою чергу, технологічні заходи оброблювання поверхні можуть призвести до додаткового зниження працездатності поверхневих шарів та виробів загалом.

Основним чинником, що визначає 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 пластичності і тим більше поверхневої деформації деталей та виробів, дуже важко розділити вплив власне нагартування та залишкових напружень на втомлюваність сталі.

Методи холодного зміцнення застосовували ще в п'ятдесятих роках минулого століття для оброблення сталей з рівноважною структурою. Проте в останні десятиріччя значного розвитку набуло зміцнення виробів в структурно нерівноважному стані, після гартування та невисокого відпуску.

Незважаючи на значну кількість праць щодо впливу нагартування на циклічну міцність сталевих виробів і деталей, в літературі практично відсутня інформація про вплив комбінованих методів пластичного деформування на опір втомлюваності деталей машин. Йдеться про цілком технологічно оправдане поєднання в зміцнювальному процесі декількох операцій холодного нагартування, наприклад, заневолювання крученням і обкатування чи розтягування та кулькоструменевого нагартування. Таке комбіноване оброблювання може стати доцільним для одночасного підвищення показників пружності та опору втомленості. Крім цього, немає інформації щодо впливу поєднаних операцій холодного деформування на кінцеве формування системи залишкових напружень, анізотропії циклічної міцності.

Технологія поверхневого зміцнення як спосіб підвищення циклічної міцності термомеханічно зміцнених сталей

Встановлено [3–6], що одне ВТМО не дає відчутного приросту міцності конструкційних середньовуглецевих помірнолегованих сталей типу 45ХНМФА, 45ХН2МФА-Ш. Тому для забезпечення високого рівня опору втомленості анізотропних термомеханічно оброблених сталей як основний чинник приймаємо збільшення пластичності, а також належну орієнтацію аустенітного зерна та строкатої структури (рис. 1), тобто оптимальну відповідність орієнтації “волокон” матеріалу системі робочих напружень розтягання, що виникають в умовах пульсивного навантаження.

Поверхнєве зміцнення низьковідпущеної загартованої сталі належить до ефективних засобів підвищення циклічної міцності. Такий процес забезпечує суттєве зміцнення за рахунок високих залишкових стискувальних напружень у приповерхневих шарах.

Сьогодні в літературі практично відсутні матеріали про вплив обкатування деталей після ВТМО. Тому доцільним було вивчити поєднаний вплив ВТМО та обкатування на втомлюваність торсійної сталі 45ХНМФА. Циклічну міцність вивчили в умовах пульсивного кручення. Пошук технології зміцнення здійснювали в напрямку використання ВТМО ($\theta = 1,6$) та пластичного нагартування – заневолювання та обкатування. Обидві операції холодного зміцнення сприяють певною мірою підвищенню циклічної міцності сталі (рис. 2, таблиця).

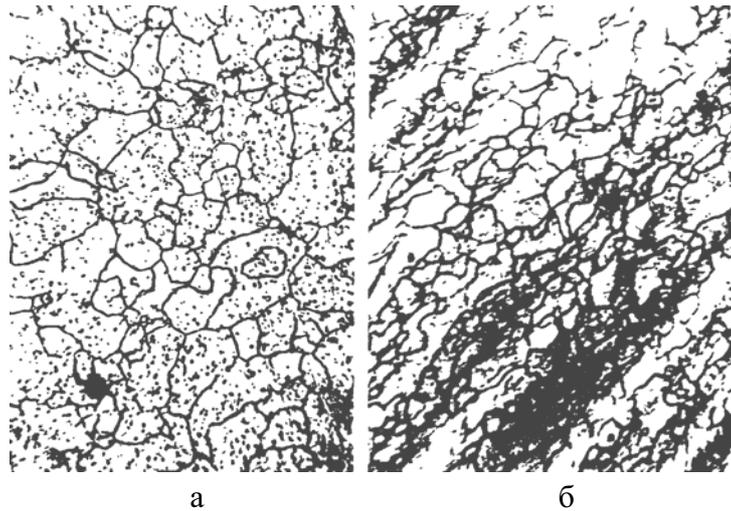


Рис. 1. Аустенітне зерно та строката структура сталі 45ХНМФА
(травлення насиченим розчином пікринової кислоти, $x \cdot 350$):
а – після звичайного гартування; б – після ВТМО

Порівняльна оцінка режимів зміцнення

№ п/п	Режим оброблювання	τ_w , МПа	$\tau_{пл}$, МПа
1	ЗТО + С(200 °С)	850	1150
2	ШТО* + С(200 °С)	900	1200
3	ШТО + С(200 °С) + З(К = 0,4)	960	1550
4	ШТО + С(200 °С) + О	1130	1300
5	ШТО + С(200 °С) + О + З(К = 0,4)	1000	1600
6	ВТМО** + З (К = 0,45) + О	1270	1250
7	ВТМО + О + З (К = 0,45)	950	1450
8	ВТМО + С(200 °С) + З(К = 0,4) + О	1270	1150
9	ВТМО + С(200 °С)	1000	1150
10	ВТМО + С(200 °С) + З(К = 0,4)	1080	1540
11	ВТМО + С(200 °С) + О	1130	1280
12	ВТМО + С(200 °С) + З(К = 0,4) + О	1170	1460
13	ВТМО + З (К = 0,45) + С (200 °С) + О	1320	1320
14	ВТМО + О + С (200 °С) + З (К = 0,45)	1270	1700
.....			
46	ВТМО + С(200 °С) + З(К = 0,7) + О + С(200 °С) + З(К = 0,7) + С(200 °С) ***	1340	1750

*ШТО – швидкісне термічне оброблення.

**ВТМО – ступінь деформування $\theta = 1,6$.

***Далі у певних випадках для лаконічності будемо використовувати такі скорочення: ЗТО – звичайне гартування; О – обкатування роликми; З (К = 0,4) – заневолювання за К = 0,4; С (200 °С) – деформаційне старіння тривалістю 2 години при температурі 200 °С тощо. Якщо для зміцнення використовуються декілька операцій, то їх записуємо послідовно в порядку їх виконання, при цьому між ними ставимо знак "+" (плюс), наприклад: ВТМО + З (К = 0,4) + О і т.д. $K = \varphi_{пл} / \varphi_{зан}$.

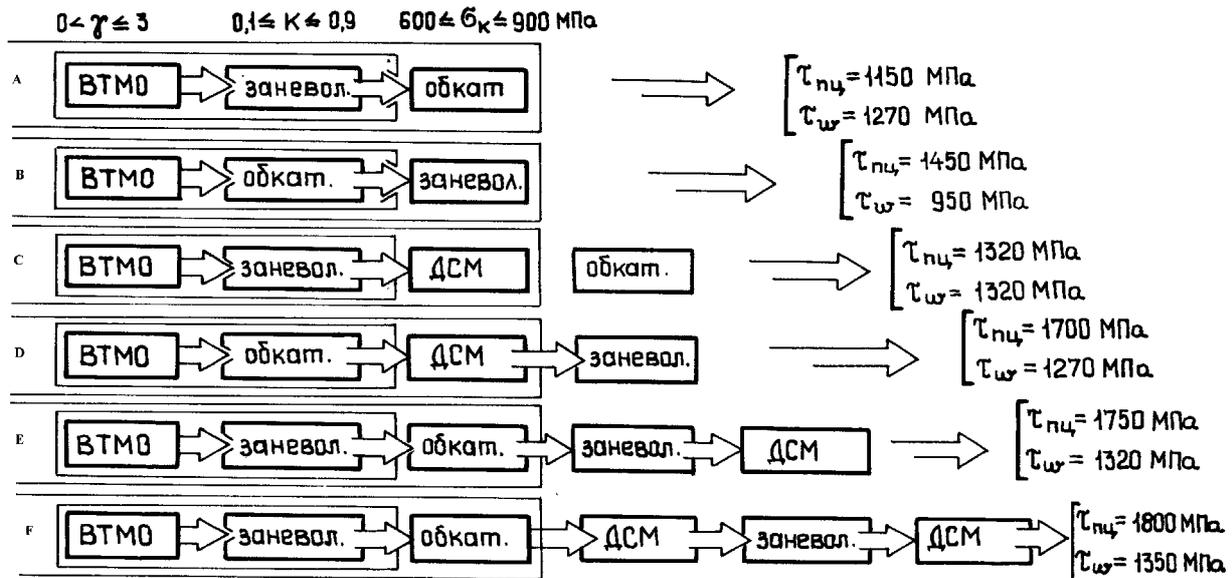


Рис. 2. Деякі пошукові схеми технологічних процесів підвищення циклічної міцності на лабораторних зразках із сталі 45XHMFA

З метою підвищення несної здатності торсійних валів часто використовують їх заневолювання. У випадку завитих пружин заневолювання полягає в їх стисненні чи розтягуванні (залежно від того, чи пружини працюють відповідно на розтягування або стискання).

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

Причини підвищеної втомлювальної міцності після VTMO треба вбачати не тільки в раціональному використанні термомеханічної анізотропії, але й в інших структурних особливостях оброблених сталей. Головне в них – диспергування, очевидно, полігональна субструктура мартенситу, здрібнення карбідних виділень, диспергування аустенітних зерен та зміцнення їх границь, а також специфічне розшарування твердого розчину за вуглецем.

Вплив заневолювання досліджено нами на лабораторних зразках після гартування й VTMO та відпуску 200 °C, 2 год.

Після ЗТО (ШТО чи VTMO) застосовували об'ємне орієнтоване кручення – заневолювання – та поверхнєве обкатування роликми. Залежно від послідовності їх виконання обидві операції не однозначно впливають на циклічну міцність (див. таблицю, реж. 6, 7; рис. 2).

Дослідження показали, що технологічна схема із застосуванням процесів VTMO з високим ступенем зсувової деформації ($\theta = 1,6$), заневолювання ($K = 0,4$) та обкатування ($P = 6500$ МПа), як і паралельно технологічна схема, що охоплює ЗТО, заневолювання з такою ж інтенсивністю та обкатування за тими ж режимами забезпечують однаковий рівень границі втомленості (рис. 3):

$$\begin{aligned} VTMO (\theta = 1,6) + O &\text{ ---} \Rightarrow \tau_w = 1130 \text{ МПа,} \\ ЗТО + O &\text{ -----} \Rightarrow \tau_w = 1130 \text{ МПа,} \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} VTMO (\theta = 1,6) + 3 + O &\text{ ---} \Rightarrow \tau_w = 1180 \text{ МПа,} \\ ЗТО + 3 + O &\text{ -} \Rightarrow \tau_w = 1180 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

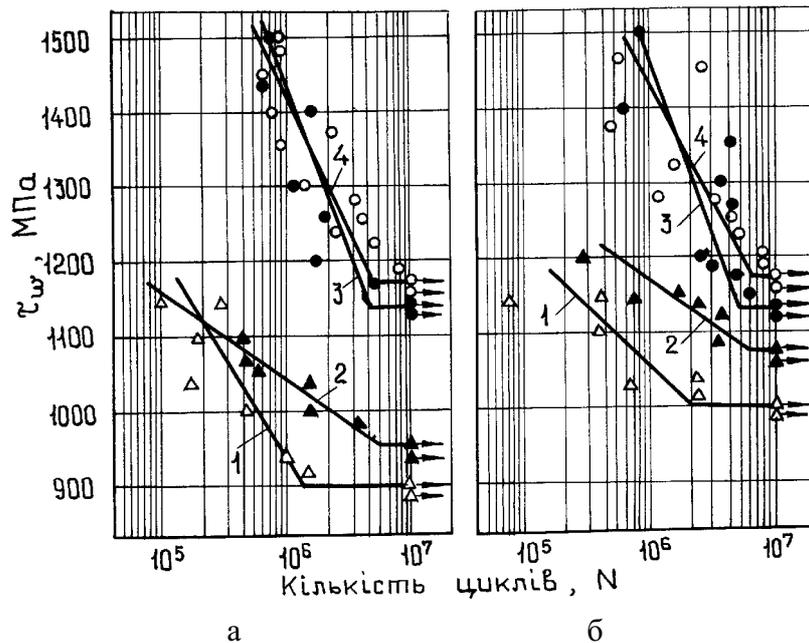


Рис. 3. Діаграми втомленості сталі 45ХНМФА, обробленої за схемами:

а – гартування; б – VTMO ($Q = 1,6$):

1 – гартування (VTMO); 2 – гартування (VTMO) + 3($K = 0,4$);

3 – гартування (VTMO) + O; 4 – гартування (VTMO) + 3($K = 0,4$) + O

Аналіз результатів виконаних досліджень дають підставу зробити допущення, що прийняті під час VTMO значення пластичності θ , які забезпечували значний вигравш міцності для сталі без додаткового обкатування, виявились надто великими для поверхневих шарів матеріалу інтенсивно нагартованих обкатуванням і заневолюванням.

Далі досліджували зразки після такого зміцнення (рис. 2, схема А):

VTMO ($Q = 0,86$, відпуск $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) + заневолювання ($K = 0,4$) + обкатування.

Тоді як після одного заневолювання приріст границі втомленості дорівнює 60 МПа, після заневолювання і обкатування він досягає 280 МПа.

Крім цього, для партії зразків, що пройшли VTMO, в технологічному процесі змінили послідовність операцій холодного зміцнення: спочатку виконали обкатування, а після заневолювання за схемою Б (рис. 2):

VTMO ($Q = 0,86$, відпуск $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) + обкатування + заневолювання ($K = 0,4$).

Зміна порядку холодного зміцнення (схема Б) різко знижує границю втомленості сталі. Це, як покажемо пізніше, є наслідком порушення під час заневолювання системи сприятливих залишкових напружень стискування, сформованих при обкатуванні.

Досліди показали [5, 6], що заневолювання суттєво підвищує пружні властивості матеріалу, але відчутно знижує втомлювальну міцність. Обкатування роликami значно підвищує втомлювальну міцність і, знову ж, небажано низько зменшує пружні властивості матеріалу (рис. 2).

Вплив технології комплексного зміцнення на границю пропорційності та циклічну міцність сталі 45ХНМФА

Післядеформаційний відпуск мартенситу сприяє суттєвому підвищенню пружних властивостей сталей, який охоплює деформацію та наступне старіння при температурах, що не перевищують температур відпуску після гартування (див. таблицю).

Для ефективного зміцнення деформаційним старінням потрібний 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 під час деформаційного старіння мартенситу є результатом сумарного впливу деформації та післядеформаційного відпуску. Тому важливим є вміння розділити внесений в ефект зміцнення мартенситу процеси, що перебігають під час деформації перед відпуском і старіння під час післядеформаційного нагрівання. У таблиці подані результати змін границі пропорційності та границі втомленості зразків, виготовлених із сталі 45ХНМФА, оброблених за схемами з додатковим проміжним двогодинним відпуском при температурі 200 °С.

Порівняння режимів 7 і 9 (див. таблицю) свідчить про те, що проміжний відпуск після заневолювання підвищує границі пропорційності та втомленості. Якщо проміжний відпуск здійснити після операції обкатування, коли фінішною операцією є заневолювання, то спостерігається значне підвищення границі пропорційності та границі втомленості (таблиця, режими 8 і 11).

Ще вищі значення властивостей міцності отримано після подвійного відпуску зразків, що пройшли аналогічне зміцнення. Найвищого рівня пружних властивостей ($\tau_{ny} = 1750$ МПа, режим 4б) вдалось досягнути під час оброблювання з подвійним заневолюванням, коли повторне заневолювання здійснювали після обкатування перед фінішним відпуском. Такий режим зміцнення заслуговує уваги, оскільки, як випливає з результатів, він поряд із отриманням високих пружних властивостей забезпечує також високу втомлювальну міцність.

1. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка стали. – М., 1967 – Т.1, 2. – 596 с.
2. Романів О.М., Черепанова Г.І. Термомеханічне зміцнення сталі. – К., 1966. – 220 с.
3. Кукляк Н.Л., Романив О.Н. Об эффективности высокотемпературой термомеханической обработки среднелегированных сталей // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 5. – С. 51–57.
4. Кукляк Н.Л., Романив О.Н., Черепанова Г.И. и др. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства стали 45ХНМФА при кручении // Физико-химическая механика материалов. – 1968. – № 2. – С. 128–132.
5. Кукляк М.Л. Методи підвищення довговічності пружних елементів транспортних машин. – Львів, 1997. – 206 с.
6. Сорокинский И.С., Кукляк Н.Л., Романив О.Н. и др. Влияние комплексной обработки с использованием ВТМО и холодного наклепа на циклическую прочность и другие свойства стали 45ХНМФА // Физико-химическая механика материалов. – 1970. – № 6. – С. 16–19.