

УДК 621.787-19+621.789-1

М.Л. Кукляк, Г.В. Гаврилов
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ, ЗМІЩЕНИХ ЗА КОМПЛЕКСНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

© Кукляк М.Л., Гаврилов Г.В., 2002

Показано, що окремі операції холодного нагартування, виконані як після звичайного гартування, так і після високотемпературного термомеханічного оброблення, сприяють підвищенню границь пропорційності та втомленості, що пов'язано з виникненням у деталях системи залишкових макронапружень. Поєднання в одному технологічному процесі заневолювання і обкатування призводить до суттєвої зміни характеристик пружності.

In this article the influence of separate operations by means of surface plastic deformation on the operational characteristics of products is described. The increase of the operational characteristics is determined by presence of residual macrostresses. The essential change of the elastic characteristics is connected to presence in technological process of overlapping of technological operations by means of surface plastic deformation.

Залишкові напруження – це ті, що існують в деталях за умов відсутності зовнішнього впливу (силового, температурного). Вони залишаються в деталях після процесу їх виготовлення. Їх можна розділити на макро- та мікронапруження. Відмінність їх полягає у швидкості зміни напружень в просторових координатах.

Якщо в межах розміру зерна матеріалу напруження змінюються несуттєво, то їх можна зарахувати до числа макронапружень. Для таких напружень цілком допустиме представлення про ізотропний матеріал. Звичайні напруження від зовнішніх навантажень належать до макронапружень.

Мікронапруження зазнають різних змін у межах зерна – кристалітного агрегату. Вони зв'язані з анізотропією кристалів, орієнтацією кристалографічних площин, з наявністю різних фаз тощо.

Для оцінки впливу залишкових напружень на міцність і деформації деталей враховується дія макроскопічних напружень. Вплив мікронапружень не досліджено, оскільки невідомі рівень цих напружень і його зміна залежно від технологічних факторів; характер розподілу мікронапружень підпорядковується статистичним закономірностям.

Результати досліджень сталі 45ХНМФА [1] показали, що окремі операції холодного нагартування, виконані як після звичайного термічного гартування (ЗТО), так і після високотемпературного термомеханічного оброблення (ВТМО), сприяють підвищенню границь пропорційності та втомленості, що переважно пов'язано з виникненням у зразках системи залишкових макронапружень. Разом з тим поєднання в одному технологічному процесі і заневолювання, і обкатування [1, 3] призводить до суттєвої зміни характеристик пружності та втомленості. Це очевидно зумовлено перерозподілом і, можливо, в окремих випадках анігіляцією цих напружень. Тому заслуговує на увагу аналіз залишкових напружень, що виникають під час операцій комплексного зміцнення.

Заневолювання як орієнтоване нагартування крученням супроводжується неоднорідною пластичною деформацією від осі до зовнішнього діаметра зразка, що створює систему залишкових дотичних напружень. Ці напруження в поверхневих шарах зразка спрямовані в протилежний бік відносно робочих напружень. Отже, приріст границь пропорційності та втомленості у разі прикладання "прямого" навантаження можна інтерпретувати як сумарний ефект від віднімання залишкових дотичних напружень від нагартування. Разом з тим, якщо прикласти робочі напруження протилежного напрямку, тобто протилежне за знаком навантаженню під час заневолювання, то проявиться сильно виражений ефект Баушінгера, зумовлений як власне орієнтованим нагартуванням, так і підсумовуванням робочих і залишкових напружень.

Оцінку залишкових дотичних напружень порівняно легко можна визначити за величиною розкручування зразків за методикою Н.Н. Давиденкова. Поверхневі шари знімали електрохімічним стравлюванням. Величину розкручування зразка виміряли за допомогою оптичного катетометра (рис. 1).

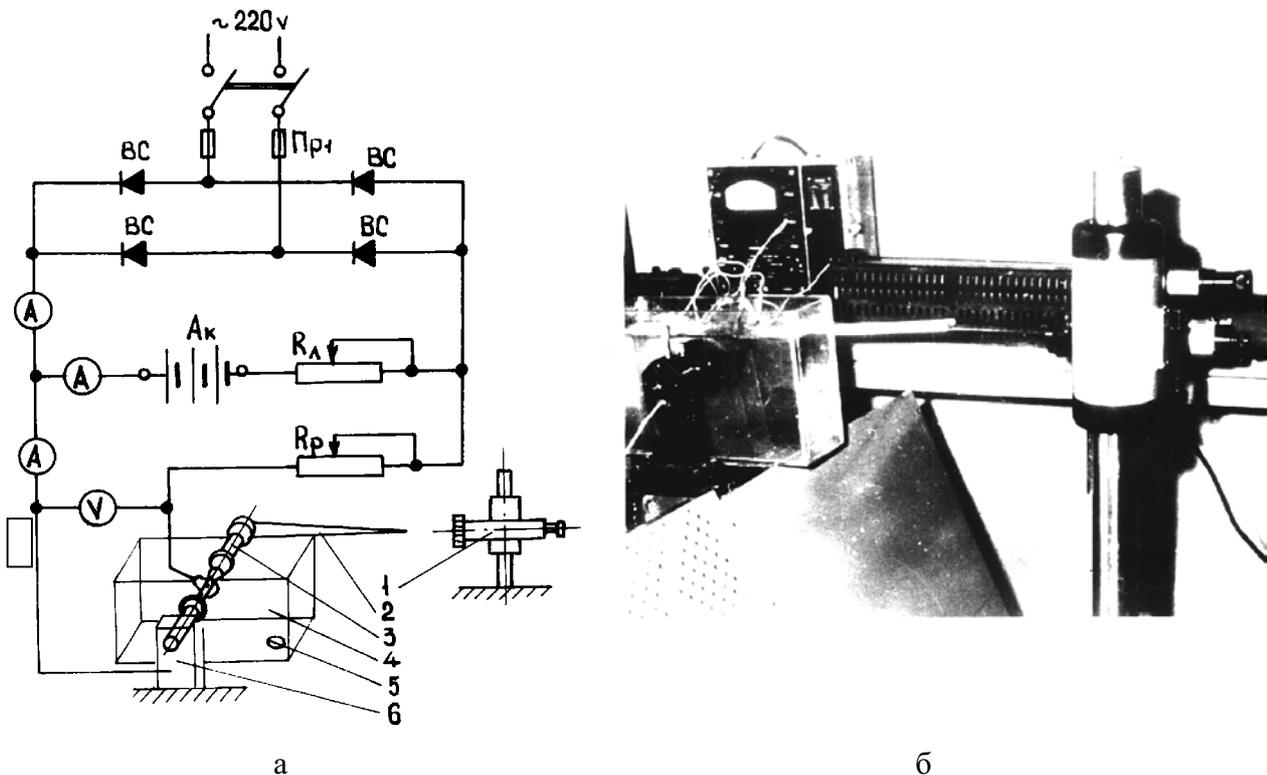


Рис. 1. Принципова схема приладу для вивчення залишкових напружень

На рис. 2, а зображена еюра розподілу в поверхневих шарах загартованого зразка дотичних напружень після заневолювання ($K = 0,7$).

Заневолювання сталі зі структурою відпущеного мартенситу сприяє утворенню значних дотичних напружень, які за своїм знаком спрямовані в протилежний бік стосовно робочих напружень ($\tau_{\max} = 420$ МПа). ВТМО з подальшим заневолюванням сприяє утворенню залишкових дотичних напружень, близьких за величиною до тих, які виникають після звичайного гартування з ідентичним заневолюванням. Такий висновок знаходиться у повній відповідності з результатами, викладеними в [2], де показано, що ВТМО не створює в матеріалі системи залишкових дотичних макропружень.

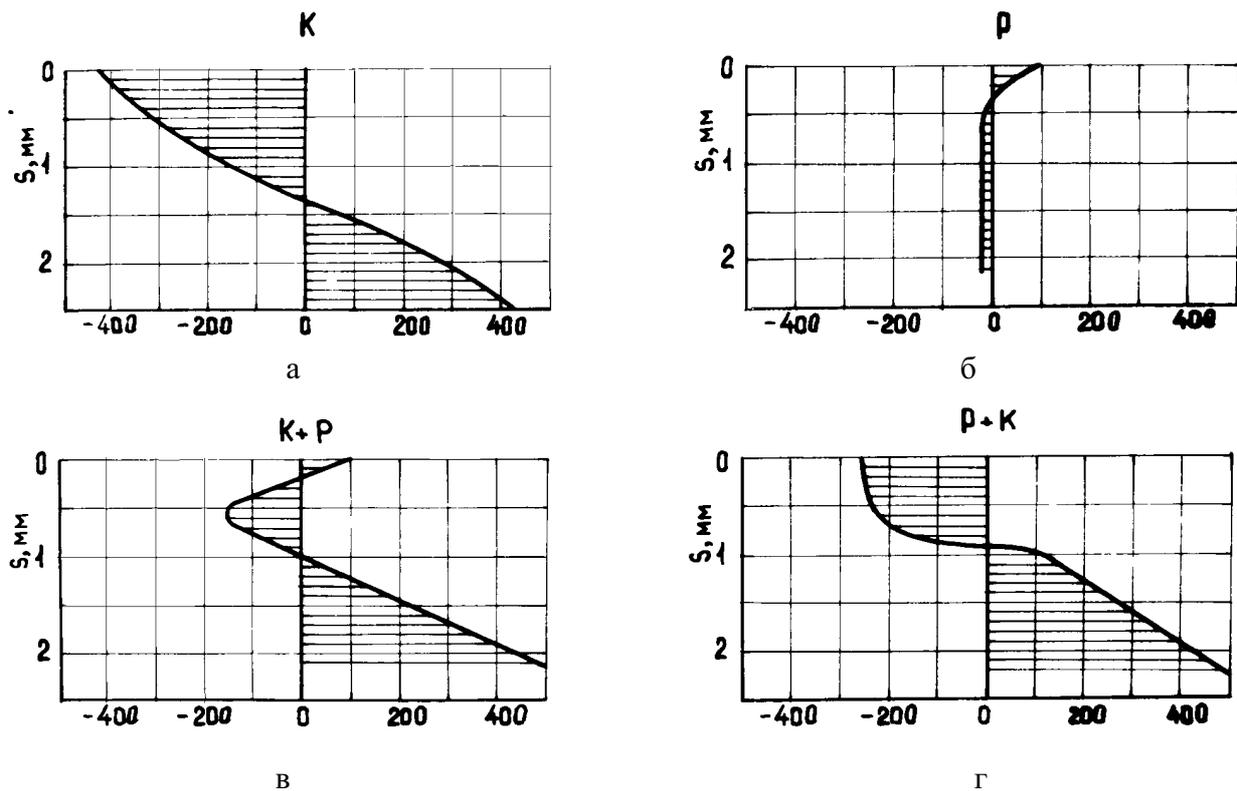


Рис. 2. Епюри розподілу дотичних напружень у приповерхневих шарах після:
 а – заневолювання; б – обкатування; в – заневолювання + обкатування;
 г – обкатування + заневолювання

Відомо, що обкатування сприяє утворенню осьових напружень стискування. Разом з тим із рис. 2, б бачимо, що під час обкатування виникають також дотичні складові напружень, які за своїм знаком протилежні напруженням від заневолювання. Рис. 2, г, у свою чергу, свідчить про те, що обкатування після заневолювання різко змінює характер приповерхневих залишкових дотичних напружень. Так же різко змінюється епюра $\tau_{\text{зал}}$ у випадку, якщо заневолювання виконувати після обкатування. Отримані результати дають уявлення тільки про дотичні напруження, але шляхом їх приведення до головних нормальних напружень можна прийти до висновку, що як обкатування, так і заневолювання сильно деструктуризує систему залишкових напружень, які виникли під час попередніх операцій холодного зміцнення.

Розглянемо вплив деформаційного старіння на стійкість системи залишкових дотичних макронапружень. Відповідні епюри залишкових напружень зображені на рис. 3, з яких видно, що деформаційне старіння призводить до часткової, проте дуже помірної релаксації залишкових напружень.

Отже, вплив деформаційного старіння на границю пружності і втомленості зумовлений безпосередньо субструктурними змінами в сталі, але не температурними факторами, здатними змінити чи усунути систему залишкових напружень.

Встановлено, що за певних умов циклічна деформація може зумовити значну релаксацію залишкових напружень, що безумовно проявляється в ослабленні впливу останніх на опір руйнуванню втомленістю.

Досліджували конструкційну сталь 20Х у відпаленому стані, з якої виготовили зразки з циліндричною робочою частиною $\varnothing 9$ мм і довжиною 55 мм. Шліфовані зразки скручували

до залишкової зсувової деформації на поверхні $\theta = 0,28$. Після скручування їх не піддавали ніякому додатковому механічному оброблюванню, щоб не змінити залишкові напруження у перерізі зразка. У табл. 1 наведені результати, що показують вплив скручування на величину границі втомленості зразків, випробуваних в умовах циклічного кручення та кругового чистого згинання на базі $6 \cdot 10^6$ циклів.

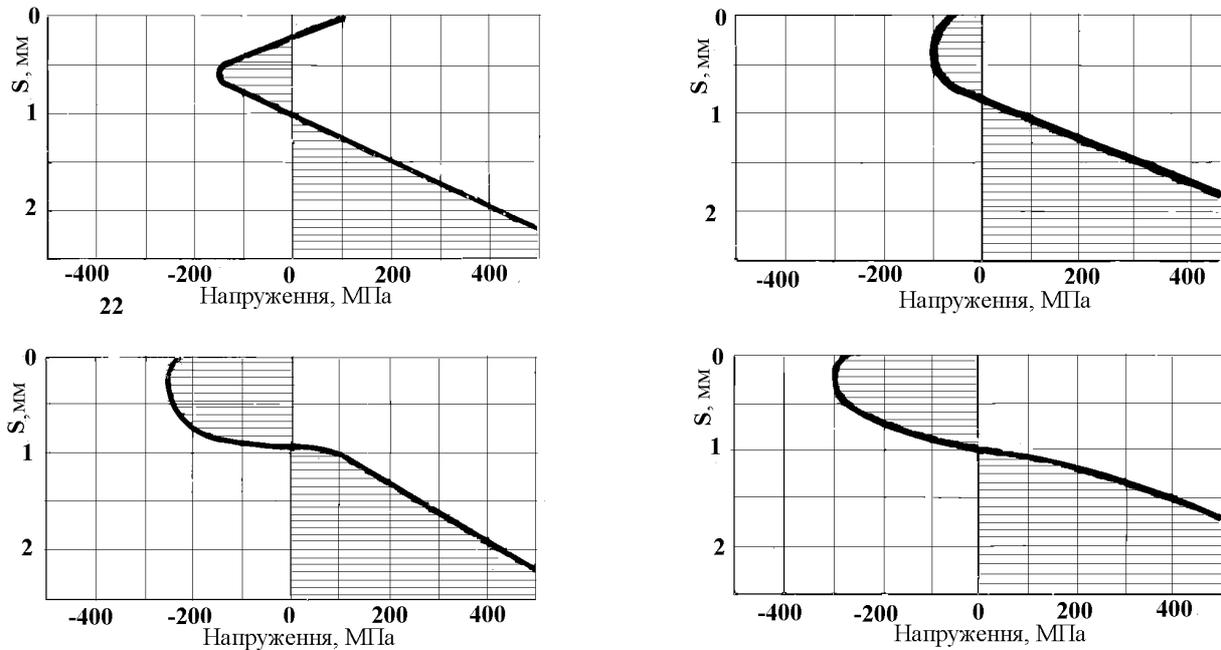


Рис. 3. Вплив деформаційного старіння на релаксацію залишкових напружень

Таблиця 1

Вплив нагартовування на циклічну міцність

Міцність недеформованих зразків, МПа		Міцність деформованих зразків, МПа		Підвищення циклічної міцності, %	
τ_{-1}	σ_{-1}	$\overline{\tau}_{-1}$	$\overline{\sigma}_{-1}$	$K = \frac{\overline{\tau}_{-1}}{\tau_{-1}}$	$K = \frac{\overline{\sigma}_{-1}}{\sigma_{-1}}$
130	212	390	267	107	126

У зв'язку з відчутним підвищенням втомлювальної міцності визначали вплив циклічного навантаження на стійкість дотичних залишкових напружень. На рис. 4 зображені епюри їх розподілу в перерізі зразка, скрученого до рівня циклічного навантаження, а також після тренування циклічними крутільними навантаженнями різної тривалості та інтенсивності. Номінальні підраховані напруження тренування τ підтримували постійними в межах кожного тренування за допомогою тензометричного стабілізатора навантаження; малоциклове навантаження здійснювали вручну.

У табл. 2 для деяких випадків навантаження наведені значення залишкових напружень τ^* у приповерхневому шарі зразків (стан цього шару визначає рівень втомлювальної міцності під час навантаження крученням чи згинанням).

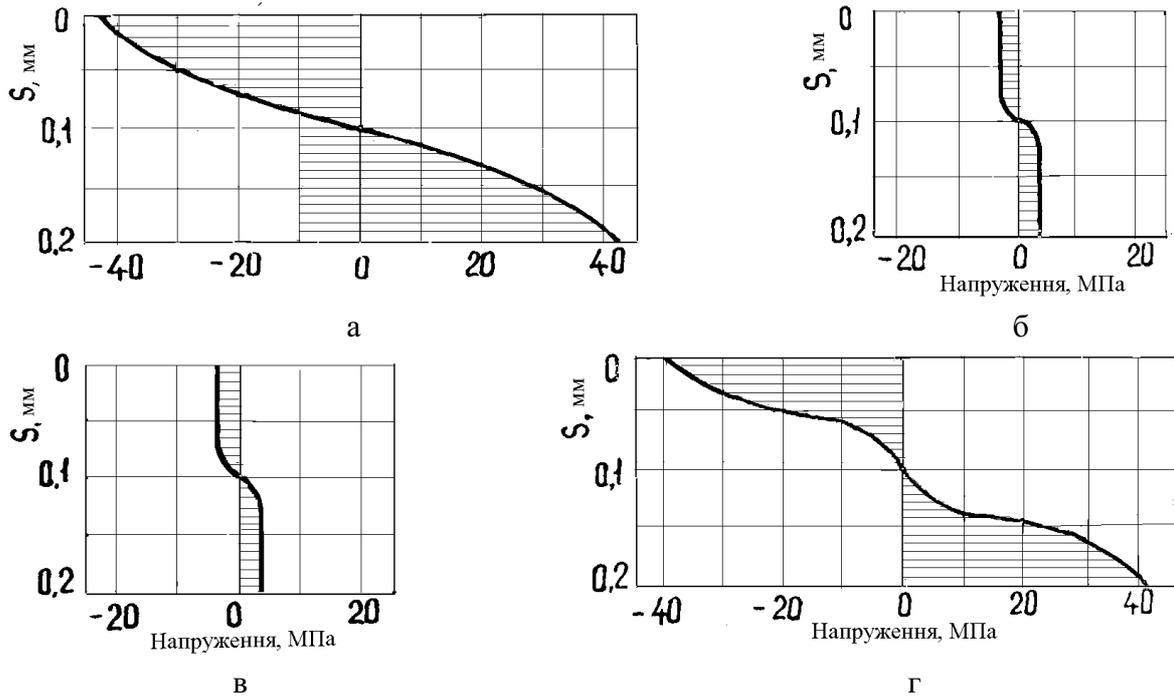


Рис. 4. Етюра розподілу дотичних напружень після циклічного кручення (а, б, в) та колового згину (г)

Представлені на рис. 4 та у табл. 2 результати досліджень свідчать про те, що створені пластичним скручуванням залишкові напруження надто швидко релаксують під впливом циклічного крутильного навантаження, що перевищує границю втомленості нагартованого матеріалу ($\tau_{-1} = 145$ МПа).

Таблиця 2

Зміна залишкових напружень залежно від величини циклічних навантажень

№ зразка	τ , МПа	σ , МПа	N, циклів	τ^* , МПа
1	0	-	0	42
4	0	-	0	27
9	173	-	0,5	3,7
7	173	-	2	2,0
6	173	-	20	1,5
10	160	-),5	17
12	160	-	1,5	12
2	160	-	2×10^3	7,0
14	145	-	1×10^5	3,0
21	130	-	5×10^5	2,5
20	100	-	2×10^6	36
16	-	278	$1,49 \times 10^6$	32
17	-	273	6×10^5	40

Інтенсивність релаксації зростає із збільшенням амплітуди напружень, при цьому на рівні амплітуди $\tau = 173$ МПа спостерігається суттєвий спад напружень вже у першому циклі, напрямок якого протилежний попередньо утвореній значній деформації. Циклічне навантаження на рівні нової границі втомленості матеріалу також призводить до швидкого зняття залишкових

напружень. Отже, залишкові напруження, утворені неоднорідною пластичною деформацією, не впливають на обмежену витривалість, а також на границю втомленості сталі під час циклічного кручення. Можна допустити, що інтенсивна релаксація напружень, подібна до спостережуваної нами, буде існувати в усіх випадках прямого циклічного навантаження (тобто навантаження, виконуваного в площині попереднього нагартування, коли орієнтація головних осей під час нагартування та робочому циклічному навантаженні, а також вид напруженого стану збігаються). Явище релаксації залишкових напружень пов'язано, на наш погляд, з ефектом Баушінгера під час циклічного прямого навантаження, який проявляється в зменшенні опору малим пластичним деформаціям в напрямку, протилежному до попереднього (технологічного) деформування. Як видно з табл. 2 залишкові напруження знімаються тільки під впливом циклічних напружень, амплітуда яких перевищує $\tau_{0,3}$ – границю текучості у напрямку, протилежному до попереднього деформування (рис. 4).

Спостерігали, що циклічна релаксація залишкових напружень супроводжується дрейфом закрученого зразка в бік, протилежний попередньому деформуванню, що схематично зображено на рис. 5.

Така циклічна повзучість поздовжніх волокон є явищем універсальнішим, ніж релаксація залишкових напружень, і може спостерігатись у випадках пластичного деформування без утворення залишкових напружень (наприклад, під час нагартування зразків розтягуванням і подальших випробуваннях "розтягування – стискування").

Досліджено також стійкість залишкових дотичних напружень, створених пластичним скручуванням стосовного непрямого циклічного навантаження круговим згинанням.

У табл. 2 представлено залишкові напруження τ^* в приповерхневому шарі зразків після тренувань напруженнями згинання на рівні та вище рівня границі втомленості σ_{-1} . Із цієї таблиці видно, що навіть надто тривалим циклічним тренуванням в умовах згинання ніскільки не вдається зменшити залишкові дотичні напруження. Отже, протилежне циклічне навантаження утруднює зняття залишкових напружень, оскільки поперечні перерізи зразка мають тоді "підвищену жорсткість" порівняно із випадком прямого навантаження. В останньому випадку на певному рівні напружень проявляється циклічна направлена повзучість матеріалу, в умовах якої релаксують залишкові напруження.

1. Сорокивский 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. 15–19. 2. Романив О.Н. Некоторые вопросы прочности и механики разрушения термически и термомеханически упрочненных высокопрочных сталей: Дис. ...д-ра техн. наук. – Львов, 1970, – 364 с. 3. Кукляк М.Л. Про вибір параметрів технологічного процесу ВТМО сталі 45ХН2МФА-Ш // Вісн. ДУ "Львівська Політехніка". – 1996. – № 303. – С. 55–62.

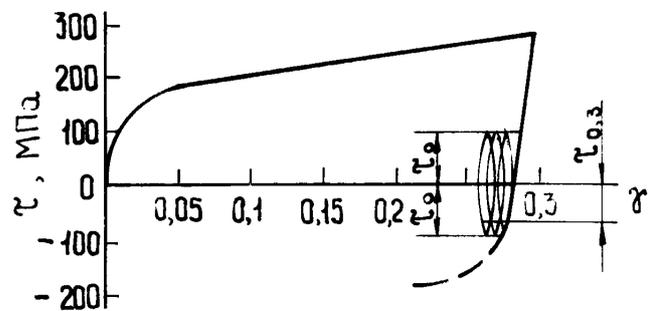


Рис. 5. Схема повзучості в умовах циклічного навантаження матеріалу в площині попереднього пластичного деформування