

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Субботіна Валерія Валеріївна

УДК 621.787.4

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ
ПІСЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металознавства та термічної обробки металів Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор Ільїнський Олександр Іванович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри “Металознавство та термічна обробка металів”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки Дяченко Світлана Степанівна, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри “Технології машинобудування та ремонту машин”; кандидат технічних наук, доцент Пчелінцев Віктор Олександрович, Сумський державний університет, доцент кафедри “Прикладне матеріалознавство та ТКМ”.

Провідна установа: національний аерокосмічний університет ім. М.Є.Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, кафедра авіаційного матеріалознавства

Захист відбудеться „ 13 ” квітня 2006р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Автореферат розісланий „ 4 ” березня 2006р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Кияшко І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема підвищення конструкційної міцності набуває все більшого значення у зв'язку з ростом навантаження та швидкостей сучасних машин. Особливо велике значення має підвищення конструкційної міцності деталей із високоміцних сталей, що забезпечує велику несучу здатність виробів при їхній малій масі. Проблема підвищення міцності, надійності та довговічності відповідальних важконавантажених деталей машин із високоміцних сталей особливо актуальна у зв'язку з дією повторно-перемінних навантажень, що викликають у металі втомні явища. Серед прогресивних процесів, направлених на підвищення надійності та довговічності таких виробів, особливе місце займає зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД). Висока ефективність та технологічність методів ППД відводить їм роль значного резерву підвищення якості виробів машинобудування. Разом з цим, питання правильного призначення способу зміцнення та забезпечення оптимальних режимів для високоміцних матеріалів до цього часу залишились маловивченими і це не дає можливості обґрунтовано призначати режими зміцнення деталей ППД, проводити їх оптимізацію.

Вивчення фізико-механічних та структурних характеристик, насамперед, залишкових макронапружень, під час вибору методів та режимів ППД, а також закономірностей їх зміни за умов, близьких до експлуатаційних, дозволить запропонувати не тільки оптимальні способи зміцнення деталей, але і розробити науково-обґрунтовані норми такого вибору. Управління залишковими напруженнями дозволить більш повно реалізувати потенційні можливості високоміцних сталей. Розв'язуванню цих актуальних питань і присвячена ця робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана на кафедрі “Металознавство та термічна обробка металів” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” по пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” в рамках держбюджетних тем МОН України “Фундаментальні фізико-хімічні дослідження альтернативних палив і альтернативних конструкційних матеріалів в перспективних вітчизняних двигунах внутрішнього згорання для автотранспортних засобів”(№ Д/Р 0100U001654, 2000-2002р.) та “Фундаментальні дослідження по забезпеченню фізичної та параметричної надійності перспективних вітчизняних автотранспортних двигунів внутрішнього згорання” (№ Д/Р0103U001499, 2003-2005р.), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є встановлення головних закономірностей формування залишкового напруженого стану у деталях із високоміцних сталей при деформуванні обкачуванням роликками; розробка

способів управління залишковими макронапруженнями та видача рекомендацій по оптимізації режимів та технології обкачування роликami, що забезпечують максимальну ефективність ППД у підвищенні втомної міцності.

Для досягнення мети, вказаної в роботі, були поставлені такі задачі:

- вивчити структурні особливості поверхневого шару високоміцних сталей після об'ємної термічної зміцнюючої обробки та наступного зміцнення ППД обкачуванням роликami;
- розробити методологічні підходи щодо застосування рентгенівської тензометрії для вимірювання залишкових макронапружень на натурних деталях;
- дослідити напружено-деформований стан поверхневого шару високоміцних сталей залежно від режимів ППД;
- установити зв'язок між рівнем залишкових макронапружень, наведених ППД, та втомною міцністю;
- дослідити вплив повторних проходів при обкачуванні на напружений стан та втомну міцність;
- дослідити розподіл залишкових макронапружень у зонах, сформованих при нестабілізованих режимах обкачування;
- дослідити стійкість напруженого стану, що сформований ППД, у процесі статичного та циклічного навантаження гладких деталей та деталей з концентраторами напружень;
- розробити способи впливу на величину та розподіл залишкових макронапружень з урахуванням умов експлуатації деталей;
- на основі отриманих результатів дати технологічні рекомендації, що забезпечують підвищення працездатності, довговічності та надійності виробів з високоміцних сталей.

Об'єкт дослідження: високоміцні сталі ($\sigma_B \geq 1700$ МПа) після зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

Предмет дослідження: залишковий напружено-деформований стан поверхневого шару високоміцних сталей, що сформований ППД, та втомна міцність сталей.

Методи дослідження: визначення напружено-деформованого стану поверхневого шару здійснюється експериментальним шляхом з використанням методу рентгенівської тензометрії. Для вивчення структурних особливостей сталей використані методи металографічного, рентгеноструктурного аналізів. Для оцінки службових характеристик визначені механічні властивості сталей та проведені випробування на втому як на зразках, так і на натурних деталях.

Наукова новизна роботи:

1. Встановлені основні закономірності формування залишкового напруженого стану при деформуванні обкачуванням роликami і показано, що критерієм якості поверхні деталей з високоміцних сталей

після ППД є рівень залишкових напружень. За результатами вимірів осьових залишкових напружень можливо прогнозувати границю витривалості.

2. Вперше виявлені та теоретично обґрунтовані основні закономірності появи знеміцнених локальних зон при обкачуванні роликками (кульками), які знижують ефективність ППД і визначають їх втомну міцність.
3. Вперше показано, що багаторазове обкачування є засобом регулювання залишкових напружень та формування необхідної епюри залишкових напружень в поверхневому шарі виробів.
4. Обґрунтовано принципи вибору технологічної схеми обкачування роликками, що забезпечують рівномірність розподілу залишкових напружень по всій поверхні зразка та, як наслідок, рівномірність оброблюємих виробів.
5. Отримані експериментальні дані про відсутність концентрації залишкових напружень на конструктивних концентраторах напружень.
6. Встановлено умови стійкості залишкових напружень у процесі циклічного навантаження.

Практична цінність і реалізація результатів роботи. На підставі отриманих експериментальних даних з'явилася можливість подальшого удосконалення технології поверхневого пластичного деформування обкачуванням роликками важконавантажених виробів із високоміцних сталей для забезпечення максимальної ефективності процесу.

Для важконавантажених виробів із сталей 30ХГСН2А и 45ХНМФА забезпечено підвищення їх надійності та довговічності за рахунок наведення ППД в поверхневому шарі залишкових макронапружень потрібного рівня та знаку. Досягнуто підвищення втомної міцності на 30ч50 %.

Підвищена ефективність ППД обкачування роликками шляхом зміни схеми формування зміцненої зони. Зміна технологічної схеми обкачування роликками забезпечила підвищення надійності та довговічності важконавантажених виробів із високоміцних сталей у 1,5 - 2 рази. Результати підтверджені актом про застосування розробок та результатів досліджень на ДП „Завод ім. В.О.Малишева” (м. Харків).

Розроблено спосіб зміцнення пресових з'єднань типу вал-втулка із високоміцної сталі, який включає обкачування поверхні вала роликками в декілька проходів, що забезпечує необхідний рівень залишкових напружень у поверхневому шарі і, як наслідок, підвищення втомної міцності (Пат.45234А UA, С21 Д7/04/15.03.2002. Бюл.№3).

Обґрунтованість та достовірність сформульованих у дисертації наукових положень і висновків забезпечується коректним застосуванням сучасних методів експериментальних досліджень, плануванням дослідів, точністю вимірювань, порівнянням з практичними та теоретичними результатами вітчизняних та зарубіжних авторів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи здобувачем отримані самостійно. У колективних публікаціях внесок здобувача полягає в наступному:

1. Дослідження та обробка результатів вимірювання залишкових напружень у зразках та виробих із високоміцних сталей 30ХГСН2А і 45ХНМФА.
2. Експериментальні дослідження втомної міцності натурних виробів після обкачування поверхні роликками .
3. Вивчення впливу багаторазового обкачування на рівень залишкових напружень і втомну міцність високоміцних сталей .
4. Формування наукових положень щодо підвищення втомної міцності виробів з конструктивними концентраторами напружень та проведення експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: VIII Міжнародній конференції „Нові конструкційні сталі та стопи та методи їх обробки для підвищення надійності довговічності виробів” (м. Запоріжжя, 2000р.); Міжнародній науково-практичній конференції „Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, дозвілля” (м. Харків, 2001р.); I-ом Международном симпозиуме „Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов в машиностроении” (г. Харьков, 2001г.); Першій обласній конференції молодих науковців „Тобі Харківщина – пошук молодих” у межах обласного форуму „Освіта, наука, виробництво – шлях інтеграції” (м. Харків, 2002р.); Международной конференции „Физика прочности и пластичности материалов” (г.Тольятти, 2003г.); Международной научно-практической конференции „100 лет производственной и научной работы Центральной лаборатории ГП „Завод им. В.А.Малышева” (г. Харьков, 2003г.); XII Міжнародній науково-практичній конференції „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2004р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2005р.)

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 10 наукових роботах, 6 з них – у фахових виданнях, рекомендованих ВАК України, і отримано 1 деклараційний патент України на винахід.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і налічує 154 сторінок, у тому числі 140 сторінок основного тексту, 54 рисунків, 17 таблиць. Список використаних літературних джерел налічує 133 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовані мета та задачі досліджень, викладена наукова новизна, практична цінність отриманих результатів, дана загальна характеристика підвищення міцності, надійності та довговічності відповідальних важконавантажених деталей машин із високоміцних сталей.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено огляд літературних джерел, присвячених проблемі підвищення міцності, надійності та довговічності конструкційних сталей, оскільки робочі швидкості та навантаження машин викликають необхідність підвищення цих характеристик. Переважна більшість деталей зазнає впливи змінних навантажень, що викликають втомні явища, тому проблема підвищення втомної міцності є однією з найважливіших проблем машинобудування. Відзначено, що головні види деформації – згин та кручення, викликають максимальні навантаження на поверхні деталей. Розглянуті основні шляхи зміцнення поверхні, отже і всієї деталі, шляхом застосування термічної, хіміко-термічної обробки різних видів, а також механічної обробки різних видів.

Успішне вирішення проблеми тісно пов'язане з удосконаленням технології виробництва деталей і, зокрема, створенням необхідних показників якості поверхні та поверхневого шару, що, в першу чергу, визначає експлуатаційні властивості виробів машин.

Показано, що важливе місце у вирішенні цих питань відводиться зміцненню поверхневим пластичним деформуванням (ППД), що забезпечує, з точки зору експлуатації, необхідні характеристики поверхні та поверхневого шару. Однак, отримання оптимального поєднання показників якості зміцненого поверхневого шару на цей час неможливе через відсутність чітких критеріїв та оцінок.

Розглянуті основні критерії та механізми зміцнення матеріалів методом ППД та їх вплив на втомну міцність. Вказано, що вплив ППД досліджено стосовно матеріалів з низькою та середньою міцністю, щодо високоміцних матеріалів (з мартенсітною структурою), то такі дані обмежені.

Зроблено висновок, що для розв'язання проблеми підвищення втомної міцності високоміцних сталей необхідні нові критерії оцінки якості поверхні та поверхневого шару. На цій підставі сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі наведені відомості про матеріали, що були використані у роботі, та методи їх дослідження.

Експерименти проводилися на циліндричних зразках та деталях зі сталей 30ХГСН2А і 45ХНМФА у високоміцному стані ($\sigma_B \geq 1700$ МПа), який досягався об'ємною термічною обробкою, ПТМО і ВТМО. Кінцеве зміцнення поверхневого шару забезпечувалося поверхневим пластичним деформуванням (ППД) обкачуванням роликками. Обкачування роликками проводилося на гідравлічному трьохроликовому пристрої з застосуванням роликів різного

профільного радіуса робочого профілю ($r_{пр} = 5, 12, 22$ мм), зусилля обкачування змінювалося від 1 до 15 кН, подача – від 0,22 до 0,66 мм/об, кількість проходів – від 1 до 3.

Вплив режимів обкачування на довговічність матеріалу оцінювали згідно результатів втомних випробувань, які проводили на універсальній гідравлічній машині з пульсатором при односторонньому плоскому згинанні. У ході випробувань визначали границю обмеженої витривалості на базі 10^6 циклів та довговічності при $y_{max} = 1400$ МПа (частота випробувань 11 Гц, коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0,25$). Застосовувались також випробування згином з обертанням (машина МВП-10000) для визначення границі обмеженої витривалості σ_{-1} на базі 10^7 циклів (частота випробувань 30 Гц).

Залишковий напружений стан у поверхневому шарі зразків та деталей визначався методом рентгенівської тензометрії – методом багаторазових похилих зйомок ($\sin^2\psi$ – метод), що дає змогу вимірювати будь-яку складову залишкових напружень у локальних місцях. Залишковий напружено-деформований стан оцінювали по осьовим й тангенціальним напруженням. Рентгенівський аналіз проводився на установці ДРОН-3.

Шорсткість поверхні досліджувалася за допомогою профілографа – профілометра „ВІ-Калібр” при вертикальному збільшенні 10^4 , горизонтальному – 40. Механічні властивості вимірювали на стандартному обладнанні відповідно з вимогами ДСТУ.

Дослідження мікроструктури зразків виконували за допомогою металографічних методів. Субструктурні характеристики (розмір ОКР і мікродеформація) та вміст вуглецю в мартенситі гартування та відпуску визначали за допомогою рентгеноструктурного аналізу.

Математичну обробку експериментальних даних здійснювали з використанням стандартних математичних методів і сучасної обчислювальної техніки.

Дослідно-промислові випробування проводили за участю працівників Центральної лабораторії ДП „Завод ім. В.О.Малишева” на натурних виробках.

В третьому розділі приведені дослідження структури високоміцних сталей після різних видів термічної обробки, вплив ППД на структурні характеристики, досліджено вплив структури мартенситу на залишковий напружений стан поверхневого шару.

Різний структурний стан мартенситу досягався різними способами термічної обробки: об’ємна термічна обробка без захисту від знеуглецювання ($h = 0,1-0,15$ мм) та з захистом від знеуглецювання (мідніння); ПТМО (гідропресування зі ступенем деформації 30 %; відпуску 300°C , об’ємна термічна обробка); ВТМО (деформація на 30 %). Металографічний аналіз структури сталі після різних видів термічної обробки показав (рис. 1), що мартенсит має переважно рейкову морфологію. Але після об’ємної обробки (рис. 1 а) елементи структури значно грубіші, зустрічаються крупні кристали пластинчастого мартенситу. ВТМО та ПТМО (рис. 1 б) забезпечує отримання

структури без пластинчастих кристалів мартенситу. Морфологічна неоднорідність мартенситу викликає його концентраційну неоднорідність. Вивчення складу мартенситу за вуглецем показало (табл. 1), що ВТМО та ПТМО приводять до суттєвого зниження середнього вмісту вуглецю у мартенситі порівняно з об'ємним гартуванням, тобто дає змогу отримати однорідний за складом мартенсит як після загартування, так і після відпуску.

У сталях 30ХГСН2А та 45ХНМФА після ВТМО та ПТМО розмір блоків значно менший, ніж після звичайного гартування, при цьому рівень мікродеформацій однаковий. Структурні особливості сталі у високоміцному стані впливають і на рівень залишкових напружень, що наведені ППД (табл. 1). Так, наявність знеуглецьованого шару призводить до утворення маломіцного мартенситу в поверхневому шарі і, як наслідок, низького рівня стискувальних залишкових напружень після ППД.

Висока ступінь дисперсності мартенситу та однорідність його по вуглецю (після ВТМО та ПТМО) забезпечують більший ресурс пластичності поверхневого шару, а тому і максимальний рівень стискувальних залишкових макронапружень.

Встановлено, що наступне ППД обкачуванням роликками високоміцних сталей практично не впливає на більшість структурних характеристик матеріалу, хоча при цьому фіксується незначна ступінь нахилу ($\Delta HV50$) (рис. 2) та покращується чистота поверхні деталей (рис. 3).

Аналіз отриманих результатів дав змогу встановити, що у випадку високоміцних сталей ефективність ППД зумовлена рівнем стискувальних залишкових напружень (табл. 1), а роль наклепу незначна.

У четвертому розділі наведені експериментальні дані стосовно впливу головних параметрів обкачування (зусилля обкачування, радіуса робочого профілю роликів, числа проходів та величини подачі) на величину та розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі зразків після обкачування та результати втомних випробувань. Зроблені такі висновки: число проходів від 1 до 3 та подача в межах від 0,22 до 0,66 мм/об не впливає на напружений стан після ППД; зміна напрямку пластичного деформування при повторних проходах шляхом зміни напрямку обертання деталі та подачі не приводять до зміни рівня залишкових напружень; результати випробувань залишкових напружень узгоджуються з втомними випробуваннями, тобто при усіх змінах перерахованих параметрів у вказаних межах втомна міцність зразків не змінювалася; суттєвий вплив на залишковий напружений стан має зусилля обкачування та радіус робочого профілю роликів.

На рис. 4 та 5 подані результати впливу зусилля обкачування на рівень залишкових напружень по поверхні (рис. 4) та їх розподіл по глибині поверхневого шару (рис. 5). Тангенціальні напруження (y_{ϕ}) менш чутливі до зусилля обкачування і їх насичення відбувається уже при зусиллі $P = 3$ кН, тоді як осеві напруження (y_z) монотонно зростають до $P = 10$ кН. З ростом

зусилля обкачування збільшується товщина шару, яка знаходиться під дією стискальних напружень.

Досліджено вплив зусилля обкачування на рівень залишкових напружень на поверхні та їх розподіл при різних радіусах робочого профілю ролика. Отримані результати підтвердили, що осьові залишкові напруження більш чутливі до зміни параметрів обкачування і вони визначають втомну міцність деталей. З урахуванням природного розкиду вимірів на різних зразках одержали лінійну залежність між границею витривалості та осьовими залишковими напруженнями. Тим самим, за результатами вимірів залишкових напружень з достатньою ступінню точності можна прогнозувати границю витривалості.

Результати цього розділу показали, що у циліндричних деталях після поверхневого деформування обкачуванням роликками забезпечується однорідність залишкового напруженого стану у зонах стабілізованого режиму обкачування. Проте, при обкачуванні завжди є специфічні зони, такі як перехід від обкачуваних до необкачуваних місць; зон, що сформовані без продольної подачі роликів, та перекриття зон обкачування суміжних частин деталі. Дані про залишкові напруження у таких зонах практично відсутні, оскільки існує така думка, що ніяких особливостей у розподілі залишкових напружень у таких зонах не повинно спостерігатися. Застосування у даній роботі рентгенівської тензометрії, що відзначається високою локальністю, дало змогу виявити особливості у розподілі залишкових напружень у таких специфічних зонах. Результати досліджень свідчать про наявність значного градієнту залишкових напружень, що призводить навіть до зміни їх знаку, тобто появи розтягувальних напружень у локальних місцях після обкачування роликками.

Результати втомних випробувань повністю пояснюються розподілом залишкових макронапружень і свідчать про те, що наявність таких знеміцнених (з точки зору рівня стискувальних залишкових напружень) зон знижує ефективність ППД. Отримані результати мають теоретичне та практичне значення і повинні враховуватися при створенні технології обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням.

Виявлені принципово нові закономірності для випадку обкачування у два проходи. При обкачуванні у два проходи завжди спостерігається зниження границі витривалості, якщо зусилля при другому проході нижче, ніж зусилля при першому проході, що підтверджується відповідною зміною рівня залишкових стискувальних напружень на поверхні деталі після обробки. Показано, що, коли зміцнений шар формується за два проходи і при другому проході застосовується зусилля, відмінне від першого проході, то рівень залишкових напружень на поверхні деталей визначається зусиллям другого проході, а глибина їх залягання – проходом з більшим зусиллям обкачування (рис. 6).

Аналогічні закономірності одержані і для обкачування у два проходи роликками з різними радіусами робочого профілю. Під час другого проходу напружено-деформований стан поверхні повністю переформовується і визначається умовами деформування при останньому проході. Це має підтвердження як вимірами залишкових напружень, так і випробуваннями на втому.

Проведене дослідження закономірностей формування напруженого стану при багаторазовому деформуванні обкачуванням роликками вказує на можливість регулювання залишкових напружень у поверхневому шарі. Змінюючи режими обкачування, можна забезпечити необхідний рівень залишкових напружень на поверхні та створити необхідну епюру розподілу залишкових напружень по глибині, а тим самим підвищити ефективність ППД.

У п'ятому розділі розглянуті питання технології обкачування довгомірних деталей та деталей ускладненої конфігурації, коли немає змоги та недоцільно проводити обкачування у один прохід. Питанню вибору найбільш доцільних схем обкачування та обґрунтування цього вибору у сучасній технології зміцнення ППД приділяється недостатня увага. При обкачуванні деталей у декілька етапів неминуче формуються зони перекриття – частини деталей, що зміцнені двічі. Дослідження напруженого стану у зонах перекриття показало, що у таких зонах спостерігається порушення однорідності розподілу залишкових напружень (рис. 7).

Якщо в зоні перекриття, сформованій початком обкачування при другому проході (рис. 7 а), спостерігається незначне порушення однорідності розподілу залишкових макронапружень (200-500 МПа), то в зоні перекриття, сформованій кінцем обкачування при другому проході (рис. 7 б), відбувається практично повне знеміцнення. Напружений стан зон перекриття визначає втомну міцність деталей. Якщо зона початку обкачування зменшує границю витривалості на 6 %, то зона кінця обкачування – на 30 %. Тобто обкачування з перекриттям знижує границю витривалості зміцнених ППД зразків. Особливо шкідлива для втоми зона кінця обкачування. Злами досліджених зразків також підтверджують знеміцнювальну дію зони кінця обкачування на границю витривалості: зразки з зоною початку обкачування руйнувалися з очагом під поверхнею; зразки з зоною кінця обкачування завжди мали очаг руйнування на поверхні.

У роботі проведена оцінка ефективності різних технологічних схем обкачування (табл. 2). Обкачування в один або два проходи з одним и тим же зусиллям обкачування дає однаковий результат при втомних випробуваннях, тому одержані закономірності про вплив зон перекриття на втомну міцність ніяк не пов'язані з кількістю проходів при обкачуванні. Умови формування зони перекриття (технологічна схема обкачування) суттєво впливають на границю витривалості: у зразках із зонами зростання зусилля при другому проході границя витривалості на 30 % вище, ніж із зонами зниження зусилля. Наявність зони перекриття на поверхні після обкачування хоч і забезпечує

зміцнення, порівняно з вихідним станом (без обкачування), але при цьому тільки частково реалізується ефект зміцнення, який слід очікувати згідно заданих режимів обкачування. Так, для плавного зниження зусилля – на 16 %, та плавного підвищення зусилля - на 50 %, замість очікуваних 60 % при обкачуванні без формування зон перекриття.

Таблиця 2

Вплив технологічної схеми обкачування на втомну міцність сталі 30ХГСН2А

Таким чином, аналіз виявив, що технологічна схема обкачування є важливим параметром процесу зміцнення, який необхідно враховувати та призначати нарівні з іншими параметрами (зусилля, геометрія зміцнювального інструменту, подача та інші). Із цих результатів дослідження випливає і практична рекомендація: при призначенні технологічної схеми обкачування слід уникати зон перекриття, що сформовані зниженням зусилля обкачування при другому проході.

Той факт, що повторне обкачування з тим же зусиллям ($P_1 = P_2$) не змінює величину границі витривалості, дозволяє рекомендувати таку обробку для виправлення порушень, які можуть бути допущені при першому проході (наприклад, обрив зміцненого шару, зупинка обкатного ролика, обкачування зношеними роликами тощо).

Пояснення цих результатів пов'язане з різними умовами формування зміцнених зон при різних технологічних схемах обкачування. При обкачуванні з зонами перекриття зі зростанням зусилля обкачування при другому проході хвиля пластично-деформованого матеріалу, що переміщується перед обкатним роликом, виганяється за межі зони навантаження на край зразка. У випадку формування зони перекриття зниженням зусилля при другому проході, обкачування завершується посередині зразка, тобто у самій навантаженій ділянці, на цій же ділянці знаходиться і хвиля пластично-деформованого матеріалу, яка має від'ємний вплив на втомну міцність.

На підставі проведених випробувань, стосовно зразків після обкачування з зонами перекриття, отримано важливий з практичної точки зору результат: у зонах перекриття, сформованих плавним зниженням зусилля при другому проході, мають місце ділянки з різним ступенем зміцнення, яке значно відрізняється від очікуваного для даного режиму. В межах цієї зони є ділянка з мінімальним ступенем зміцнення, де і слід чекати втомне руйнування. Формування зони з плавним зростанням зусилля при другому проході практично не знижує втомну міцність. Перевірка отриманих закономірностей була проведена на реальних торсіонних валах із сталі 45ХНМФА. Зміна технологічної схеми обкачування у відповідності з висловленими концепціями (формування зони перекриття плавним зростанням зусилля) дозволила уникнути появи знеміцнених місць в зонах перекриття, що забезпечило рівномірність вала по довжині та нейтралізувати вплив галтелей як

концентраторів напружень. Порівняння довговічності валів, що обкачувалися за різними технологічними схемами (плавне зростання та плавне зниження зусилля при формуванні зони перекриття) показало, що довговічність валів збільшилася у 2-2,5 рази.

Одержані результати випробувань та досліджень дають змогу рекомендувати технологічні схеми обкачування валів (табл. 3), що забезпечують максимальну ефективність ППД.

Таблиця 3

Технологічні схеми ППД обкачуванням роликками

У відповідності з розробками можна рекомендувати для циліндричних деталей такі технологічні схеми обкачування:

- якщо дозволяє конструкція деталей та обкатних пристроїв, обкачування потрібно проводити за один прохід без переривів у подачі, зупинок роликів та інших порушень параметрів режиму; у навантажених частинах деталей не допускається обрив зміцненого шару, а також наявність зон початку та кінця обкачування;
- при необхідності зміцнення з зонами перекриття, що формуються за два проходи, рекомендуються такі схеми обкачування:
 - а) обкачування у два проходи з зонами перекриття у будь-якій частині деталі: зона перекриття формується зростанням зусилля обкачування при другому проході; довжина зони перекриття повинна перевищувати довжину зон зростання та зниження зусилля при відповідних проходах;
 - б) обкачування у два проходи деталей з перехідними галтелями: за перший прохід проводиться обкачування стержня, за другий – галтелей; обкачування галтелей відбувається плавним зростанням зусилля;
- обкачування за два проходи по всій довжині деталей; зусилля обкачування другого проходу не нижче зусилля першого проходу; схема дає змогу виправляти деталі, що були обкатані з порушенням при першому проході, тобто усувати дефектні місця.

В таблиці 4 приведені технологічні схеми обкачування, які знижують ефективність ППД. Вони мають один і той же недолік: зона перекриття формується різким або плавним зниженням зусилля при другому проході.

Відзначимо, що, окрім простих циліндричних деталей, зміцненню шляхом обкачування підлягають і деталі складної конфігурації: диски катків, диски тертя, галтелі колінчастих валів та шийки валів та інше. Виявлені у цьому дослідженні закономірності, звичайно, у повній мірі стосуються і цих деталей. Ці закономірності вимагають досить обережного підходу до вибору

технологічної схеми обкачування для різних деталей та значно полегшують роботу по вибору оптимальних схем зміцнення для деталей складної конфігурації.

Шостий розділ присвячений питанням стійкості залишкових напружень, наведених обкачуванням, у процесі циклічного і повторно-статичного згину, тому що для прогнозування надійності та довговічності деталей необхідно знати не тільки рівень стискувальних залишкових напружень, що наведені ППД, але і їхню стійкість у процесі експлуатації. Тому дослідження закономірностей зміни залишкових напружень за умов, близьких до експлуатаційних, має велике наукове та практичне значення.

На зразках з концентраторами напружень у вигляді надрізу та стяжної втулки та без концентраторів напружень проведено роздільне вивчення залишкових напружень в зонах, що знаходяться під дією стискувальних та розтягувальних напружень від згину. Виявлена принципово різна картина зміни залишкових напружень у зонах стиску і розтягування від зовнішнього навантаження. Так, у зоні розтягування залишкові напруження у процесі навантаження майже не змінюються, у зонах же стиску спостерігається суттєве зменшення вихідного рівня напружень і навіть перехід у розтягувальні у випадку повторно-статичних навантажень. Наявність конструктивних концентраторів напружень призводить до більш інтенсивного зниження рівня залишкових напружень.

Спостерігається відповідність між результатами втомних випробувань по тріщині у зоні стиску та характером зміни залишкових напружень. Різка зміна залишкових напружень під дією циклічного стиску приводить до того, що перша тріщина втоми виникає на поверхні у зоні стиску.

Проведене дослідження дає змогу припустити, що у випадку знакоперемінних навантажень, початкове ушкодження у деталях із високоміцної сталі, зміцнених ППД, виникає у періоди дії стискувальної частини циклу. Зростання тріщини втоми аж до руйнування відбувається під час дії розтягувальної частини циклу.

Показано, що пошук шляхів підвищення надійності деталей з надресованою втулкою може іти як у плані підвищення рівня механічних властивостей матеріалу деталі, і в першу чергу поверхневого шару, так і в плані конструктивних змін вузла, які зможуть зменшити концентрацію згибних напружень у кромки втулки.

ВИСНОВКИ.

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної проблеми збільшення експлуатаційної надійності деталей машин, виготовлених із високоміцних сталей ($\sigma_B \geq 1700$ МПа), шляхом наведення в поверхневому шарі

деталі залишкових стискувальних напружень засобом поверхневого пластичного деформування (ППД).

1. В роботі експериментально показано, що залишковий напружено-деформований стан, наведений ППД, є визначальним фактором у підвищенні втомної міцності високоміцних сталей. Критерієм якості поверхні деталей із високоміцних сталей після ППД є величина залишкових напружень. За результатами вимірів залишкових напружень з достатнім ступенем точності можна прогнозувати границю витривалості.
2. Процес обкачування роликами (кульками) не завжди забезпечує однорідний залишковий напружений стан по всій поверхні деталі. Цей процес може супроводжуватися виникненням знеміцнених (з точки зору рівня стискувальних залишкових напружень) локальних зон, які знижують ефективність ППД та визначають втомну міцність. Завдяки використанню в роботі рентгенівської тензометрії для вимірювання напружень були виявлені знеміцнені зони.
3. Виявлені принципово нові закономірності для випадку обкачування роликами у два і більше проходів, які вказують на можливість регулювання залишкових напружень у поверхневому шарі. Зміна режимів обкачування при багаторазовому деформуванні дає можливість забезпечити потрібний рівень залишкових напружень на поверхні та сформувати необхідну епюру залишкових напружень у поверхневому шарі оброблюваних виробів і тим самим підвищити ефективність ППД.
4. Обкачування деталей у декілька етапів формує зони перекриття (частини деталей, що зміцнені двічі), де порушується однорідність розподілу залишкових напружень. Напружений стан зон перекриття визначає втомну міцність деталей. Особливо шкідлива для втоми зона перекриття, що сформована кінцем обкачування при другому проході – границя витривалості зменшується на 30 %. Дано пояснення цим результатам.
5. Проведена оцінка ефективності різних технологічних схем обкачування з формуванням зон перекриття. Аналіз виявив, що технологічна схема обкачування є важливим параметром процесу зміцнення, який треба враховувати та призначати нарівні з іншими параметрами ППД (зусилля, геометрія зміцнюючого інструменту, подача та інше). Тільки за рахунок зміни технологічної схеми можливо збільшити довговічність деталей з високоміцних сталей у 2-2,5 рази.
6. Прогнозування надійності та довговічності деталей потребує знання не тільки рівня стискувальних залишкових напружень, що наведені ППД, але і їхню стійкість у процесі експлуатації. Показано, що стійкість залишкових напружень у процесі циклічного і повторно-статичного згину визначається як рівнем залишкових макронапружень, так і величиною навантаження, що прикладається, та тривалістю її дії. Наявність конструктивних концентраторів напружень призводить до

більш інтенсивного зниження рівня залишкових стискувальних напружень і навіть до переходу у розтягувальні.

7. Виявлена принципово різна картина зміни залишкових напружень у зонах стиску та розтягування від зовнішнього навантаження. Втомна міцність деталей при плоскому згині визначається границею витривалості по тріщиноутворенню у зоні стиску. Максимальна довговічність виробів, що працюють у таких умовах, досягається наведенням при обкачуванні залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$), що задовольняють умові:

$$\sigma_{\text{зал}} \leq \sigma_{\text{T}} - \sigma_{\text{зг}},$$

де σ_{T} – границя текучості,
 $\sigma_{\text{зг}}$ – напруження згину.

8. Експериментально показано, що конструктивні концентратори напружень, незалежно від коефіцієнта концентрації, форми надрізу та його параметрів, не викликають концентрації залишкових напружень, що наведені ППД.
9. Враховуючи результати досліджень, був розроблений спосіб зміцнення пресових з'єднань типу вал-втулка із високоміцної сталі, який включає обкачування поверхні вала роликками в декілька проходів, що забезпечує необхідний рівень залишкових напружень у поверхневому шарі і, як наслідок, підвищення втомної міцності (Пат.45234А UA, С21 Д7/04/15.03.2002. Бюл.№3).
10. Отримані результати були використані при оптимізації режимів та схем обкачування для відповідальних важконавантажених деталей із високоміцних сталей (30ХГСН2А, 45ХНМФА) на ДП „Завод ім. В.О.Малишева”(м. Харків).

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Белозерова В.В. (Субботина В.В.) Влияние структурного состояния стали 30ХГСН2А на уровень и устойчивость остаточных напряжений, наведенных ППД // Вестник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 2000. – вип. 83. – с.40-43.
2. Белозеров В.В., Белозерова В.В. (Субботина В.В.), Ильинский А.И., Махатилова А.И. Повышение надежности и долговечности изделий из высокопрочных сталей с конструктивными концентраторами напряжений // Збірник наукових праць VIII Міжнародної конференції “Нові конструкційні сталі та стопи та методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів”. – Запоріжжя. – 2000. – с. 16-18.
 Здобувачеві належить формування наукових положень щодо підвищення втомної міцності виробів з конструктивними концентраторами напружень та проведення експериментальних досліджень.

3. Ильинский А.И., Белозеров В.В., Белозерова В.В. (Субботина В.В.), Махатилова А.И. Упрочнение прессовых соединений типа вал-втулка поверхностным пластическим деформированием // Вестник Национального технического университета “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2001. – вип.7. – с. 106-108.
Здобувачеві належить дослідження та обробка результатів вимірювання залишкових напружень у зразках та виробах із високоміцних сталей.
4. Белозеров В.В., Белозерова В.В. (Субботина В.В.), Махатилова А.И. Фактор остаточных напряжений в усталостной прочности высокопрочных сталей // Сб. докладов II-го Международного симпозиума “Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов в машиностроении”. – Харьков. – 2001. – с. 144-148.
Здобувачеві належить обробка результатів вимірювання залишкових напружень у зразках та виробах із високоміцних сталей 30ХГСН2А і 45ХНМФА.
5. Белозерова В.В. (Субботина В.В.). О причинах снижения эффективности ППД деталей из высокопрочных сталей // Вестник Национального технического университета “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. – вып.6. – том 2. – с. 60-66.
6. Деклараційний патент на винахід 45234 АUA, 7 С21Д7/04/15.03.2002 р. Спосіб зміцнення пресових з'єднань типу вал-втулка. Білозеров В.В., Білозерова В.В. (Субботіна В.В.), Ільїнський О.І., Махатілова А.И. – НТУ “ХПІ”.
Здобувачеві належить експериментальні дослідження втомної міцності натурних виробів після обкачування поверхні роликками.
7. Белозеров В.В., Махатилова А.И., Субботина В.В. Разрушение высокопрочных сталей с конструктивным концентратором напряжений при циклическом нагружении // Сб. трудов Международной конференции “Физика прочности и пластичности материалов”. – Тольятти. – 2003. – т. 1. – с. 28.
Здобувачеві належить формування наукових положень щодо підвищення втомної міцності виробів з конструктивними концентраторами напружень та проведення експериментальних досліджень.
8. Белозеров В.В., Ильинский А.И., Махатилова А.И, Субботина В.В. Остаточное напряженное состояние высокопрочных сталей после поверхностного пластического деформирования // Сб. трудов Международной научно-практической конференции “100 лет производственной и научной работы Центральной лаборатории ГП “Завод им. В.А. Малышева”. – Харьков. – 2003. – с. 136-141.
Здобувачеві належить дослідження та обробка результатів вимірювання залишкових напружень у зразках та виробах із високоміцних сталей 30ХГСН2А і 45ХНМФА.

9. Белозеров В.В., Махатилова А.И., Субботина В.В. Управление величиной и распределением остаточных макронапряжений обкатыванием роликами // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. - техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004 – вып. 66. – с. 9-11.

Здобувачеві належить вивчення впливу багаторазового обкачування на рівень залишкових напружень і втомну міцність високоміцних сталей.

10. Белозеров В.В., Махатилова А.И., Субботина В.В. Поверхностное упрочнение высокопрочных сталей обкатыванием роликами // Вестник Национального технического университета “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2005. – вып.24. – с. 11-16.

Здобувачеві належить дослідження та обробка результатів вимірювання залишкових напружень у зразках та виробах із високоміцних сталей 30ХГСН2А і 45ХНМФА.

Анотація.

Субботіна В.В. Вплив залишкового напруженого стану на втомну міцність високоміцних сталей після поверхневого пластичного деформування. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за фахом 05.02.01 – Матеріалознавство. - Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2006.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності поверхневого пластичного деформування (ППД) обкачуванням роликами деталей з високоміцних сталей 30ХГСН2А та 45ХНМФА шляхом наведення у поверхневому шарі деталі необхідного рівня залишкових стискувальних макронапружень.

В роботі встановлені основні закономірності формування залишкового напруженого стану при деформуванні обкачуванням роликами і показано, що критерієм якості поверхні деталей з високоміцних сталей після ППД є рівень залишкових напружень. За результатами вимірів осьових залишкових напружень можливо прогнозувати границю витривалості.

Завдяки використанню у роботі рентгенівської тензометрії для виміру напружень були виявлені знеміцнені локальні зони на поверхні деталей (з точки зору рівня стискувальних залишкових напружень). Наявність таких зон знижує ефективність ППД та визначає втомну міцність (границя витривалості зменшується на 30 %).

Проведене комплексне дослідження фізико-механічних та структурних характеристик, насамперед, залишкових напружень, дозволило запропонувати оптимальні способи зміцнення деталей. Тільки за рахунок змін технологічної схеми обкачування роликами можливо збільшити довговічність деталей з високоміцних сталей у 2 - 2,5 рази.

Ключові слова: високоміцні сталі, обкачування роликками, залишкові напруження, границя витривалості, рентгенівська тензометрія.

Аннотация

Субботина В.В. Влияние остаточного напряженного состояния на усталостную прочность высокопрочных сталей после поверхностного пластического деформирования.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. - Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2006.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы повышения эффективности поверхностного пластического деформирования (ППД) обкатыванием роликами деталей из высокопрочных сталей 30ХГСН2А и 45ХНМФА путем формирования в поверхностных слоях детали необходимого уровня остаточных сжимающих макронапряжений.

В работе экспериментально установлены основные закономерности формирования остаточного напряженного состояния при деформировании обкатыванием роликами и показано, что критерием качества поверхности деталей из высокопрочных сталей после ППД является уровень остаточных напряжений. Выявлены принципиально разные закономерности для осевых и тангенциальных напряжений. Осевые остаточные напряжения являются наиболее чувствительными к параметрам обкатывания и они определяют усталостную прочность образцов, испытывающих циклический изгиб. Тем самым, по результатам измерений осевых остаточных напряжений можно прогнозировать предел выносливости.

Благодаря использованию в работе рентгеновской тензометрии для измерения напряжений были выявлены разупрочненные локальные зоны на поверхности деталей (с точки зрения уровня сжимающих остаточных напряжений). Результаты исследования указывают на наличие значительного градиента остаточных напряжений, что приводит даже к смене их знака, т.е. к появлению растягивающих напряжений в локальных зонах после обкатывания роликами. Наличие таких разупрочненных зон снижает эффективность ППД и определяет усталостную прочность (предел выносливости уменьшается на 30%).

Проведено исследование закономерностей формирования напряженного состояния при многократном деформировании обкатыванием роликами. Результаты указывают на возможность регулирования остаточными напряжениями в поверхностном слое. Изменяя режимы обкатывания при повторных проходах, можно обеспечить необходимый уровень остаточных напряжений на поверхности и создать необходимую эпюру распределения напряжений по глубине и тем самым повысить эффективность ППД.

В работе проведена оценка эффективности разных технологических схем обкатывания. Наличие зоны перекрытия на поверхности детали после обкатывания в несколько этапов приводит к снижению усталостной прочности за счет нарушения однородности распределения остаточных напряжений, при этом только частично реализуется эффект упрочнения, который следует ожидать для заданных режимов обкатывания. Анализ показал, что технологическая схема обкатывания является одним из определяющих параметров упрочнения, который нужно учитывать и назначать наравне с другими параметрами (усилие, геометрия упрочняющего инструмента, подача и др.).

Проведенное комплексное исследование физико-механических и структурных характеристик, прежде всего, остаточных напряжений, позволило рекомендовать оптимальные способы упрочнения деталей. Только за счет изменений технологической схемы обкатывания роликами можно увеличивать долговечность деталей из высокопрочных сталей в 2 – 2,5 раза.

Ключевые слова: высокопрочные стали, обкатывание роликами, остаточные напряжения, предел выносливости, рентгеновская тензометрия.

Abstract

V. V. Subbotina. Effect of residual stress state on fatigue durability of high-strength steels after surface plastic deformation. – Manuscript.

Thesis for degree of candidate of technical sciences on speciality 05.02.01 –Material Sciences. The Kharkov National Automobile and Highway University. Kharkov, 2006.

This thesis is focused on solving a burning problem – increasing the efficiency of surface plastic deformation (SPD) for articles made from high-strength steels 30CrMnSiNi2A and 45CrNiMoVA by means of creation in their surface layers the necessary level of residual compressive macro stresses using roller spinning.

The main generalities of residual stress state formation during roller spinning are determined. It is show that the level of residual stresses after SPD can be accepted as a criterion of surface quality for articles made from high-strength steels. Knowing the axial residual stresses it is possible to forcast the fatigue limit.

The use of X-ray for strain measuring made it possible to identify on article surfaces some local softened zones with lesser level of compressive residual stresses. The presence of such zones decreases fatigue limit by 30 % and reduces SPD efficiency.

On the base of complex research of physics mechanical and structural characteristics, primarily, residual stresses, the optimum ways of article strengthening were recommended. Changes in the technological scheme of rollers spinning alone may increase by 2 or 2.5 times the endurance of high-strength steel parts.

Key words: high-strength steel, rollers spinning, residual stresses, fatigue limit, X-ray strain measuring.