

О.Є. Семеновський, к.т.н., доц.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Підвищення технологічності виготовлення складнопрофільних деталей

Проведено аналіз існуючих проблем, що виникають в процесі виготовлення таких складнопрофільних деталей, як шестерні. Визначені можливі шляхи спрощення технологічних процесів з метою покращення економічних показників виробництва, а також зменшення браку. Проведені дослідження впливу хімічного складу сталі, її структурних параметрів на технологічні характеристики. Обґрунтовано вибір композицій хімічного складу сталі з оптимальним співвідношенням фізико-механічних і технологічних характеристик. Встановлені причини короблення деталей в процесі термічної обробки. Розроблені критерії оцінки цієї величини. При цьому вирішено завдання не тільки якісної, а й кількісної оцінки такої технологічної властивості, як схильність сталей до короблення в процесі хіміко-термічної обробки, з метою введення єдиної характеристики яка визначає схильність сталі до деформації в процесі гартування. Зменшення схильності сталі до короблення дало можливість підвищити економічні показники виробництва за рахунок зменшення кількості фінішних операцій.

Ключові слова: шестерні; сталь; легування; цементация; технологічність; короблення; внутрішні напруження.

Вступ. Сучасна техніка висуває до конструкційних матеріалів все більш високі вимоги у відношенні механічних властивостей, а серійне та масове машинобудування у відношенні їх технологічності [1]. Складнопрофільність сучасних деталей зубчастих передач вимагає включення в процес їх виготовлення операцій штампування, обробки різанням, зварювання, поверхневого зміцнення, фінішних доводочних операцій. Це накладає на матеріал усе більш високі технологічні вимоги [4]. Вибір композицій з оптимальним співвідношенням фізико-механічних і технологічних властивостей [3, 7, 9] ускладнюється недостатністю відомостей про вплив їх складу на ці характеристики. Крім того, дані які є суперечливі і носять, в основному, якісний характер [5]. Ще недостатньо даних про взаємозв'язки між різними властивостями цементувальних сталей, що не дозволяє прогнозувати ці властивості. Нами було поставлено завдання не тільки якісної, а й кількісної оцінки такої технологічної властивості, як схильність сталей до короблення в процесі хіміко-термічної обробки, з метою введення єдиної характеристики яка визначає схильність сталі до деформації в процесі гартування.

Вибір марки сталі визначається не тільки умовами експлуатації, а також технологічними можливостями устаткування. В роботах [2, 4, 8] проведений всебічний аналіз технологічних процесів та марок сталей, що застосовуються для виготовлення деталей важконавантажених зубчастих передач. Аналізуючи дані цих робіт, можна зробити висновок, що вибір матеріалу в значній мірі визначає застосування відповідної технології зміцнення.

Мета досліджень. Основним завданням нашої роботи було встановлення єдиного критерію кількісної оцінки схильності сталі до жолоблення в процесі термічної обробки для забезпечення можливості підвищення технологічності виготовлення шестерень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зміна геометричних параметрів деталей, що відбуваються в процесі хіміко-термічної обробки, є визначальним фактором для економічних показників виробництва. Усунення жолоблення вимагає проведення додаткових фінішних операцій, таких як відновлення базових отворів, шліфування торців і обробка робочих профілів. Крім того, незадовільна оброблюваність різанням матеріалів, що мають високу твердість, накладає необхідність проведення операцій захисту від насичення вуглецем в процесі цементации тих поверхонь деталі, що обробляються після хіміко-термічної обробки. Ці операції трудомісткі, енергоємні і вимагають витрати дорогих і дефіцитних матеріалів.

Актуальність питання жолоблення деталей, що підлягають поверхневу зміцненню, особливо гостро постала в зв'язку з тим, що значно зросли вимоги до металоемності і точності виготовлення зубчастих передач [4, 5]. Загальновідомо, що основною причиною жолоблення при хіміко-термічній обробці є гартування, а саме значні внутрішні напруження, які виникають в процесі мартенситного перетворення [10].

Охолодження в процесі гартування приводить до появи температурного градієнта по перетину деталей, величина якого визначається температурою нагрівання, розмірами і формою деталі, теплопровідністю сталі і охолоджуючою здатністю гартівного середовища, його циркуляцією [6].

Викладення основного матеріалу. З метою вивчення можливості виключення з технологічного процесу виготовлення шестерень трудомістких операцій шліфування евольвентних поверхонь зубців, що

пов'язано зі значними деформаціями в процесі гартування. Виходячи з проведеного аналізу технологічних процесів виготовлення складно профільних деталей в роботі постало завдання не тільки якісної, а й кількісної оцінки такої технологічної характеристики, як схильність сталей до жолоблення в процесі хіміко-термічної обробки.

Базуючись на аналізі порівняльних досліджень величини жолоблення серійних партій деталей виготовлених із різних сталей, результати яких представлено у вигляді гістограм на рисунку 1, пропонується введення єдиної характеристики яка визначає схильність сталі до деформації в процесі гартування.

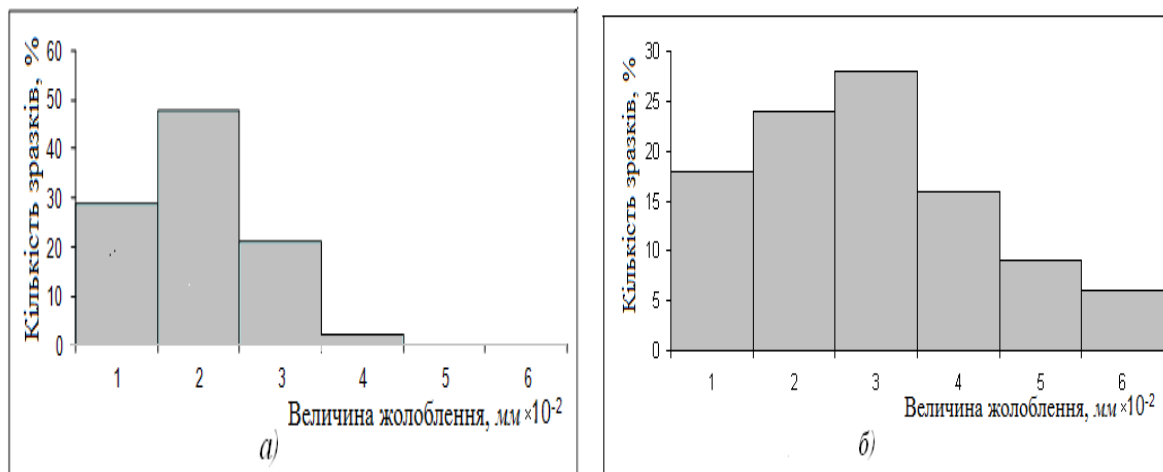


Рис. 1. Гістограми величини жолоблення деталей в процесі гартування:
а) сталь 15XГНБТЧ; б) сталь 12ХН3А

Ця величина представляє собою коефіцієнт, який визначається із співвідношення між кількістю деталей, що вкладаються в припустиму величину деформації, згідно з технічною документацією, до кількості деталей – які не вкладаються в припустимі технічною документацією відхилення (браковані деталі).

Такою кількісною характеристикою є в даному випадку інтеграл Рімана – у змісті межі сум Дарбу (як площа криволнійної трапеції). За допомогою функції-індикатора належності змінної до множини, що задається для будь-якої множини «А» та змінної величини «х» наступним чином:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

можна подати ступінчастий графік функції $\mathfrak{Z}(x)$ у вигляді:

$$\mathfrak{Z}(x) = \sum_{i=1}^m \chi_{(a_i; a_{i+1})}(x)$$

Нехай n_j – значення функції на напівзакритому інтервалі $[a_j, a_{j+1})$. Характеристика, що вводиться запишеться тоді у вигляді:

$$\mathfrak{R}(\chi) = \mathfrak{R}(\mathfrak{Z}(\chi)) = \frac{\int_a^b \left(\sum_{i=1}^m \chi_{(a_i; a_{i+1})}(s) \right) ds}{\int_a^x \left(\sum_{i=1}^m \chi_{(a_i; a_{i+1})}(s) \right) ds} = \frac{\sum_{\substack{i=j+1 \\ j: x \in [a_j, a_{j+1})}}^m \left(n_i \Delta a_{i+1} + \frac{n_j (a_{j+1} - x)}{m - j} \right)}{\sum_{\substack{i=1 \\ j: x \in [a_j, a_{j+1})}}^{j-1} \left(n_i \Delta a_{i+1} + \frac{n_j (x - a_j)}{m - j} \right)}$$

де: $\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$ – функція-індикатор належності змінної «х» до множини А;

n_j – значення функції на напівзакритому інтервалі $[a_j, a_{j+1})$ $\mathfrak{Z}(x) = \sum_{i=1}^m \chi_{(a_i; a_{i+1})}(x)$ –

функціональна залежність, що відповідає східчастому графіку, побудованому за експериментальними даними.

В нашому конкретному випадку при припустимому процентному співвідношенні кількісних характеристик бракованих і небракованих деталей у межах – 3 %, сталь 15XГНБТЧ, маючи низьку схильність до жолоблення, забезпечить величину допусків – 0,029 мм, а сталь 12ХН3А – 0,055 мм. А у

випадку коли серійна сталь забезпечить такі ж допустимі відхилення, як і розроблена, кількість бракованих деталей буде складати 30 %.

Таким чином запропонований в нашій роботі коефіцієнт дає можливість кількісно оцінювати схильність сталей до жолоблення і забезпечує можливість вибору хімічного складу сталі в залежності від необхідної величини допусків та технологічних можливостей виробництва.

Визначення цього коефіцієнту процес досить трудомісткий. Для спрощення пошукових робіт щодо дослідження цієї характеристики проведені її порівняння з іншими технологічними властивостями сталей.

З точки зору причин виникнення жолоблення деталей в процесі гартування найбільш близькою характеристикою, яка має взаємозв'язок з коефіцієнтом деформованості є величина напруження в зміцненому цементованому шарі.

Були розглянуті залежності розподілення залишкових внутрішніх напружень (рисунку 2), для сталей з різним ступенем легування.

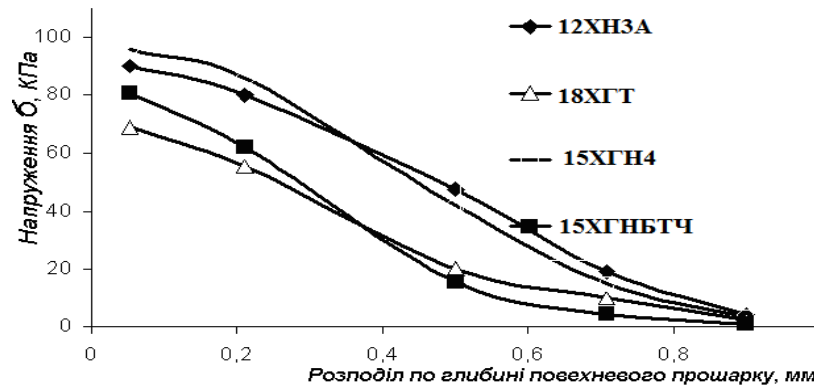


Рис. 2. Розподіл залишкових внутрішніх напружень у зміцненому шарі

Характер отриманих кривих дозволяє говорити про те, що комплексно-легована сталь має більш різке зниження рівня напружень, по мірі віддалення від поверхні, у порівнянні із серійною сталлю 12ХН3А.

Комп'ютерна обробка сумарної величини напружень усього зміцненого шару показала, що в серійної сталі 12ХН3А цей показник у 1,5 рази вище, ніж у розробленої нами сталі.

Однак рекомендувати цю характеристику для визначення схильності сталі до жолоблення недоцільно з двох причин. По-перше, величина залишкових внутрішніх напружень лише побічно пов'язана з тими напруженнями, що викликають деформацію виробу (зразка) у процесі термічної обробки, і є не причиною, а наслідком. По-друге, її визначення пов'язане зі значними технічними складнощами. У той же час, як якісна характеристика, вона підтверджує отримані нами результати при дослідженні схильностей сталей з різними композиціями легуючих елементів до жолоблення.

Найбільш близькою характеристикою, яка має зв'язок із коефіцієнтом деформованості є схильність сталі до росту аустенітного зерна в процесі нагрівання. Виходячи з фізичного змісту схильність сталі до росту аустенітного зерна при нагріванні характеризується швидкістю зміни функції, яка описує даний процес. Розглянувши графічні залежності на рисунку 3, після апроксимації експериментальних даних за допомогою лінії Тренда степеневого типу, можемо визначити швидкість зміни апроксимованих кривих як похідну $f'(t)$:

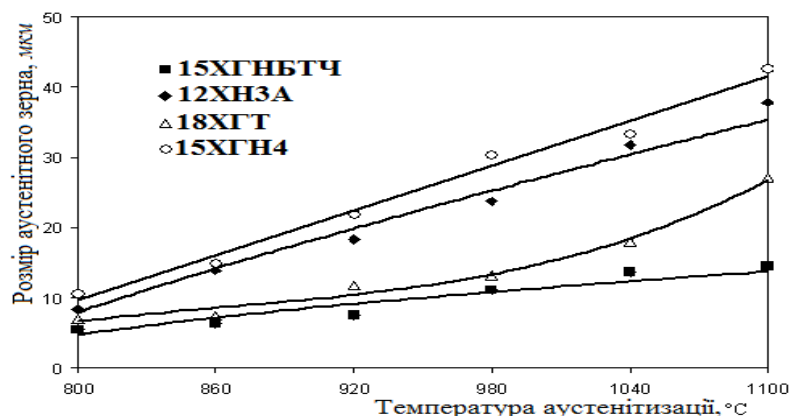


Рис. 3. Кінетика росту аустенітного зерна

Середнє значення похідної $f'(x)$ на відрізку $[a, b]$ підрахуємо виходячи із рівності:

$$\int_a^b f'(x) dx = f'_{cp}(\theta) \cdot (b - a), \text{ де } \theta \in [a, b].$$

Звідки
$$f'_{cp}(x) = \frac{\int_a^b f'(x) dx}{(b - a)}.$$

Для досліджуваних сталей розрахована величина цієї характеристики буде дорівнювати:

- для сталі 12ХН3А – 2,10298;
- для сталі 15ХГНБГЧ – 0,109308;
- для сталі 18ХГТ – 0,6006;
- для сталі 15ХГН4 – 6,3709.

Провівши аналіз математичних розрахунків технологічних характеристик досліджених сталей і порівнявши їх з введеним нами коефіцієнтом, що характеризує схильність сталі до жолоблення, можна зробити висновок, що схильність сталі до росту аустенітного зерна в процесі витримки при високих температурах має достатню кореляцію з коефіцієнтом жолоблення сталі. Це дає можливість визначатись з вибором сталі, з метою забезпечення вимог певних технологічних процесів виготовлення складнопрофільних деталей, що підлягають термічному зміцненню.

Висновки:

1. У ході проведених досліджень встановлено, що рівень жолоблення сталі в процесі хіміко-термічної обробки знаходиться в прямій залежності від ступеню диспергування вихідної аустенітної структури.

2. Для цементувальних сталей, які в процесі хіміко-термічної обробки піддаються тривалому впливу високих температур, необхідно максимально зменшити схильність сплаву до росту аустенітного зерна, що досягається комплексним легуванням такими елементами, як титан і ніобій, котрі утворюють карбідну фазу, стійку до високих температур.

3. Зменшення схильності сталі до жолоблення дає можливість підвищити економічні показники виробництва за рахунок зменшення кількості фінішних операцій в процесі виготовлення шестерень.

Список використаної літератури:

1. *Большаков В.И.* Пути повышения качества стали и проката / *В.И. Большаков* // *Металлознание и обработка металов.* – 2000. – № 2. – С. 11–22.
2. *Вороненко Б.И.* Современные высокопрочные стали для тяжело нагруженных зубчатых передач / *Б.И. Вороненко* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1996. – № 8. – С. 11–18.
3. *Горынин В.И.* Повышение сопротивляемости хрупкому разрушению перлитных и мартенситных сталей при термическом воздействии на морфологию карбидной фазы / *В.И. Горынин, С.Ю. Кондратьев, М.И. Оленин* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2013. – № 10.
4. *Зинченко В.М.* Стали для цементуемых и нитроцементуемых деталей / *В.М. Зинченко* // *Технология металлов.* – 2002. – № 7. – С. 15–21.
5. *Комаров О.С.* Комплексное модифицирование стали / *О.С. Комаров, В.И. Волосатиков, И.Б. Проворова* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2013. – № 3. – С. 21–29.
6. Рационализация параметров термической обработки стали 70Х3Г2ВТБ на основе исследований фазового состава / *С.Е. Крылова, Н.Ю. Трякина, Е.Ю. Приймак, С.О. Соколов, В.И. Грызунов* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2013. – № 1. – С. 12–19.
7. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / *О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин* и другие. – К. : Наукова думка, 1990. – С. 121–226.
8. *Фекет Дж.Р.* Применение перспективных высокопрочных сталей в автомобилестроении : доклады Международного семинара «Современные достижения в металлургии и технологии производства сталей для автомобильной промышленности», Москва, 17–18 февр., 2004. – М. : Металлургиздат, 2004. – С. 21–30.
9. *Xu Chun-fang* Механизм упрочнения и повышения вязкости стали, микролегированной Nb / *Xu Chun-fang, Wang Xin-hua, Xin Yi-de* // *Jinshu rechuli. Seryja : Heat Treat. Metals.* – 2003. – Is. 28. – No. 5. – Pp. 15–17.
10. *Brosso P.* El acero en el futuro de los materiales / *P. Brosso, C. Pagliucci* // *Siderurgia.* – 1990. – Vol. 15, No. 50. – Pp. 5–20.

References:

1. Bol'shakov, V.I. (2000), «Puti povysheniya kachestva stali i prokata», *Metallorazvedeniye i obrabotka metaliv*, No. 2, pp. 11–22.
2. Voronenko, B.I. (1996), «Sovremennyye vysokoprochnyye stali dlja tzhelozagruzhennykh zubchatykh peredach», *Metallorazvedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, No. 8, pp. 11–18.

3. Gorynin, V.I., Kondrat'ev, S.Ju. and Olenin, M.I. (2013), «Povyshenie soprotivljaemosti hrupkomu razrusheniju perlitnyh i martensitnyh stalej pri termicheskom vozdejstvii na morfologiju karbidnoj fazy», *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, No. 10.
4. Zinchenko, V.M. (2002), «Stali dlja cementuemyh i nitrocementuemyh detalej», *Tehnologija metallov*, No. 7, pp. 15–21.
5. Komarov, O.S., Volosatikov, V.I. and Provorova, I.B. (2013), «Kompleksnoe modificirovanie stali», *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, No. 3, pp. 21–29.
6. Krylova, S.E., Trjakina, N.Ju., Prijmak, E.Ju., Sokolov, S.O. and Gryzunov, V.I. (2013), «Racionalizacija parametrov termicheskaj obrabotki stali 70X3Г2ВТБ na osnove issledovanij fazovogo sostava», *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, No. 1, pp. 12–19.
7. Romaniv, O.N., Jarema, S.Ja., Nikiforhin, G.N. and others (1990), *Ustalost' i ciklicheskaja treshhinostjkost' konstrukcionnyh materialov*, Naukova dumka, Kiev, pp. 121–226.
8. Feket, Dj.R. (2004), «Primenenie perspektivnyh vysokoprochnykh stalej v avtomobilestroenii», *Doklady Mezhdunarodnogo seminara «Sovremennye dostizhenija v metallurgii i tehnologii proizvodstva stalej dlja avtomobil'noj promyshlennosti»*, Metallurgizdat, ot 17–18 fevralja, Moscow, pp. 21–30.
9. Xuc, Chun-fang, Wang, Xin-hua and Xin, Yi-de (2003), «Mehanizm uprochnenija i povyshenija vjazkosti stali, mikrolegirovannoj Nb», *Jinshu rechuli, Seryja Heat Treat. Metals*, Is. 28, No. 5, pp. 15–17.
10. Brosso, P. and Pagliucci, C. (1990), «El acero en el futuro de los materiales», *Siderurgia*, Vol. 15, No. 50, pp. 5–20.

Семеновський Олександр Євгенович – доцент кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Наукові інтереси:

- комплексно-леговані високотехнологічні сталі.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2017.