

УПРАВЛІННЯ ВЕЛИЧИНОЮ ТА РОЗПОДІЛОМ ЗАЛИШКОВИХ МАКРОНАПРУЖЕНЬ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ОБКОЧУВАННЯМ РОЛИКАМИ

Субботіна В. В., Білозеров В. В., Субботін О. В., Волков О. О., Князєв С. А.,
Рябоштан В. А., Субботін Я. О., Фесюков С. О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

***Анотація.** Для підвищення втомної міцності деталей використовується поверхневе пластичне деформування (ППД) способом обкатування роликками. Завдяки цьому формується залишковий напружений стан, який впливає на втомну міцність деталей. У роботі розглянута можливість керування рівнем та розподілом залишкових макронапружень в поверхневому шарі деталей способом обкатування роликками. Це дає змогу оптимізувати режими ППД для відповідних важко-навантажених деталей, що зазнають у процесі експлуатації циклічних навантажень.*

***Ключові слова:** поверхнева пластична деформація (ППД), обкатування роликками, рентгенівська тензометрія, високоміцні сплави, залишкові напруження.*

Вступ

Одним із найперспективніших методів збільшення терміну експлуатації деталей машин є обкочування роликками. Цей метод має низку переваг, до яких належать досить висока чистота поверхні після обкочування, велика глибина наклепаного шару, простота пристосувань для виробництва обкочування та можливість виготовлення їх на будь-якому машинобудівному заводі.

Аналіз публікацій

Високоміцні сталі повинні мати достатню пластичність, оскільки лише в цьому випадку можна зменшити локальну концентрацію напружень і запобігти небезпеці несподіваного крихкого руйнування. У роботах [1–2] зазначено, що опір втомному руйнуванню збільшується з підвищенням статичної міцності, якщо не знижуються показники пластичності, наприклад, відносне звуження.

Проблема підвищення міцності, надійності та збільшення терміну експлуатації відповідних важконавантажених деталей машин із високоміцних сталей є досить актуальною у зв'язку з дією повторно-змінних навантажень, які спричиняють у метали втомні явища. Серед прогресивних процесів, спрямованих на підвищення надійності та збільшення терміну експлуатації таких виробів, основним є зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД) [3].

Через свою високу ефективність й технологічність завдяки цим методам ППД досягається значний резерв підвищення якості виробів машинобудування. Найрізноманітніші металеві матеріали набувають сприятливих для опору втоми змін у поверхневих ша-

рах у процесі холодного пластичного деформування.

Крім якості поверхні, що визначається її механічними характеристиками та наявністю або відсутністю різноманітних поверхневих дефектів, їхніми розмірами, формою й розподілом, великий вплив на втомну міцність має рівень залишкових напружень у зовнішніх шарах матеріалу [4]. Рівень опору деталей циклічному навантаженню може бути значно збільшений, якщо на їхній поверхні будуть створені стискальні залишкові напруження.

Наявність стискальних напружень у поверхневому шарі деталі перешкоджає поширенню втомної тріщини, внаслідок чого збільшується втомна міцність. Збільшення втомної міцності зумовлене також і тим, що поверхневий шар зміцнюється (наклепується), що ускладнює створення втомної тріщини через пластичну деформацією поверхневого шару під час знакозмінного навантаження [1].

Експериментально визначено [1–4], що основу функцію в збільшенні терміну експлуатації деталей, які зазнають циклічних навантажень, здійснюють стискальні залишкові напруження, подані в поверхневому шарі пластичним деформуванням (ППД). Однак під дією циклічних навантажень залишкові напруження можуть змінюватися, якщо на поверхні виробу сумарні напруження (від зовнішнього навантаження та залишкових напружень) досягають межі плинності матеріалу. У цьому випадку відбувається процес місцевої пластичної деформація, яка зменшує рівень залишкових напружень у поверхневому шарі та навіть може призвести до зміни їхнього знака [4]. Під час дії знакозмінних

навантажень стабільність залишкового напруженого стану визначатиметься як типом розподілу залишкових напружень за глибиною поверхневого шару, так і величиною та знаком залишкових напружень на поверхні.

Таким чином, цілеспрямоване регулювання величиною та розподілом залишкових макро-напружень дасть змогу підвищити рівень їхньої стабільності в процесі циклічного навантаження деталей, а отже, й підвищити втомну міцність деталей після зміцнення ППД.

Мета та постановка завдання

Метою є досліджування рівня та знака залишкових напружень на поверхні валів зі сталі 30ХГСН2А залежно від режиму та схеми обкачування.

Виклад основного матеріалу

У роботі проаналізовано напружено-деформований стан валів зі сталі 30ХГСН2А ($\sigma_b = 1800$ МПа, HRC52), що зазнали впливу високотемпературного механічного оброблення (ВТМО) з обкочуванням роликami в один і два проходи залежно від зусилля обкочування. Обкочування здійснювали на гідравлічному трироликовому пристрої за подачі $S = 0,35$ мм/об зі швидкістю обкочування 350 об/хв, діаметр ролика становив 60 мм, профільний радіус – 5 мм.

Для вимірювання залишкових макро-напружень використовувався рентгенівський метод двосторонніх похилих зйомок [5].

Результати дослідження залишкових напружень наведені в таблиці та на рис. 1.

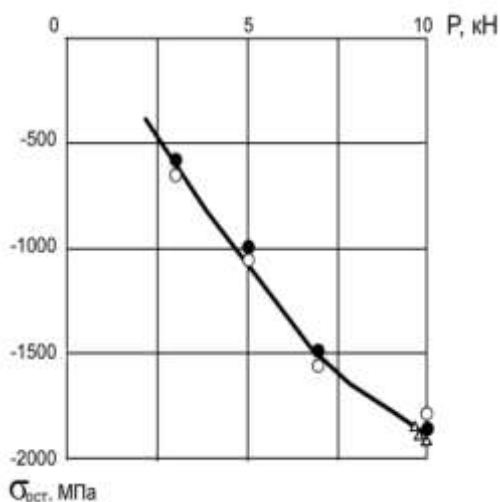


Рис. 1. Залежність осьових залишкових напружень на поверхні від зусилля обкочування: ● – 1 проход; ○ – 2 проходи (10кН + P); △ – 2 проходи (P + 10кН)

Аналіз отриманих результатів дає змогу дійти таких висновків:

- зі збільшенням зусилля обкочування від 3кН до 10кН залишкові стискальні напруження збільшуються в 2,5 рази та досягають 1800МПа для зусилля 10кН;

- обкочування в один або два проходи з одним і тим самим зусиллям обкочування не змінює напружений стан поверхневого шару зразків;

- у процесі обкочування в два проходи напружений стан на поверхні визначається зусиллям останнього (другого) проходу, про що свідчать залишкові напруги варіантів 6–11 (див. табл. 1).

Таблиця – Результати дослідження залишкових напружень

№ варіанта	Зусилля обкочування, кН		$\sigma_{зал}$, МПа
	I проход	II проход	
1	3	-	-700
2	5	-	-1000
3	7	-	-1500
4	10	-	-1750
5	10	10	-1800
6	10	3	-750
7	10	5	-1000
8	10	7	-1550
9	3	10	-1730
10	5	10	-1780
11	7	10	-1800

Останній висновок особливо важливий, оскільки свідчить про повне переформування напруженого стану на поверхні навіть зусиллям у 3 рази меншим за зусилля обкочування під час першого проходу (порівняймо, наприклад, варіанти 1 і 6; варіанти 2 і 7).

Це свідчить, зокрема, про високу пластичність матеріалу в поверхневому шарі після обкочування із зусиллям 10кН. Останній висновок переконливо ілюструється даними рис. 1: точки на графіку, що відповідають обкочуванню із зусиллям P і 10кН + P, збігаються.

Останній висновок має далекосяжні практичні наслідки: з'являється можливість керувати залишковими напруженнями на поверх способом повторного обкочування.

Повторне обкочування змінює напружений стан не тільки на оброблюваній поверхні, а й змінює епюру розподілу залишкових напружень за глибиною зміцненого шару (див. рис. 2).

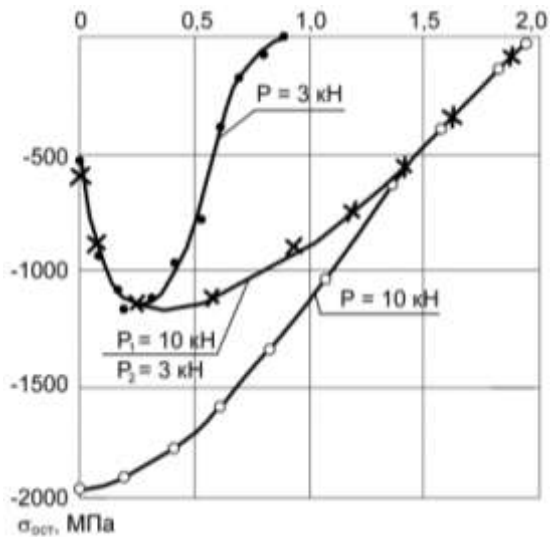


Рис. 2. Розподіл осевих залишкових макро-напружень за глибиною зміцненого шару

Додаткове обкочування з меншим зусиллям змінює епюру залишкових напружень за умови збереження їхньої глибини та ступеня наклепу.

Наведені результати вказують на те, що багаторазове деформування за різних параметрів обкочування є ефективним способом формування заданого напружено-деформованого стану поверхневого шару.

Висновки

Таким чином, здійснене дослідження дає змогу дійти висновку, що, варіюючи зусиллям обкочування, можна забезпечити необхідний рівень залишкових напружень на поверхні деталей і створити потрібну епюру розподілу залишкових напружень за глибиною, а отже, забезпечити оптимальний рівень втомної міцності.

Література

1. Гончаренко О. В. Вплив різних методів поверхневої обробки на мікроструктуру та властивості сталі. Харків: НТУ «ХП», 2020.
2. Хома М. С. Вплив поверхневого пластичного деформування на електрохімічні характеристики і опір корозійно-втомному руйнуванню нержавіючих сталей. Фіз.-хім. механіка руйнування. 1994. №1. С. 125–127.
3. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома корозійнотривких сталей і сплавів та їх зварних з'єднань. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. Київ: Наук. думка, 1998. С. 604–619.
4. Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні / О. В. Сердюк та ін. Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»). 2016. Вип. 54. С. 277–281.

5. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Китичок П. О. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.090202 «Технологія машинобудування», 7.090203 «Металорізальні верстати та системи». Житомир: ЖІТІ, 2001.
6. Матвійчук В. А., Драчишин В. І. «Вдосконалення методу поверхневого пластичного деформування на основі аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару виробів: збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки». 2012. Вип. 10(2). С. 172–177.
7. Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III–IV ступенів акредитації / О. В. Сушко та ін. Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2019. 352 с.
8. Махровський В. М., Дінжос Р. В., Лисенков Е. А. Рентгеноструктурний аналіз: навч. посіб. Миколаїв: Іліон, 2019. 150 с.
9. Krishnan K. M. Principles of materials characterization and metrology. Oxford: Oxford University Press, 2021. 868 p.

References

1. Goncharenko, O. V. (2020). Influence of different methods of surface treatment on the microstructure and properties of steel. Kharkiv: NTU "KHPI".
2. Khoma, M. S. (1994). Influence of surface plastic deformation on the electrochemical characteristics and resistance to corrosion-fatigue fracture of stainless steels. Physicochemical fracture mechanics. No. 1. P. 125–127.
3. Pokhmurskyi, V. I., Khoma, M. S. (1998). Corrosion fatigue of corrosion-resistant steels and alloys and their welded joints. Modern materials science of the XXI century. Kyiv: Nauk. Dumka. P. 604–619.
4. Serdyuk, O. V., Sivak, I. O., Sukhorukov, S. I., Sivak, R. I. (2016). Evaluation of the plasticity of a metal surface layer under non-monotonic loading. Scientific Notes: interuniversity Collection (in the field of knowledge "Technical Sciences"). Issue 54. Pp. 277–281.
5. Aftanazov, I. S., Gavrish, A. P., Kitychok, P. O. (2001). Increasing the reliability of machine parts by surface plastic deformation: study guide for students of specialties 7.090202 "Mechanical Engineering Technology", 7.090203 "Metal Cutting Machines and Systems". Zhytomyr: ZhITI.
6. Matviychuk, V. A., Drachyshyn, V. I. (2012). Improvement of the method of surface plastic deformation based on the analysis of the stress-strain state of the surface layer of products: collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences. Issue 10(2). Pp. 172–177.
7. Sushko, O. V., Posvyatenko, E. K., Kurchev, S. V. (2019). Applied Materials Science: a textbook for higher education institutions of III–IV accredi-

tation levels. Melitopol: TPC "Forward press". 352 с.

8. Makhrovskiy, V. M., Dinzhos, R. V., Lysenkov, E. A. (2019). X-ray structural analysis: textbook. Mykolaiv: Pyon. 150 с.
9. Krishnan, K. M. (2021). Principles of materials characterization and metrology. Oxford: Oxford University Press. 868 p.

Субботіна Валерія Валеріївна, д. т. н., проф., каф. «Матеріалознавство», тел.: 067-933-20-68, subbotina.valeri@gmail.com

Білозеров Валерій Володимирович, к. т. н., проф. каф. «Матеріалознавство», тел.: 067-575-29-14, belozerov.valerii@gmail.com

Субботін Олександр Володимирович, аспірант каф. «Матеріалознавство», тел.: 067-530-04-35, subbotin.alex95@gmail.com

Волков Олег Олексійович, к. т. н., доц. каф. «Матеріалознавство», тел.: +38 (097) 973-49-74, volkovoleg1978@gmail.com

Князев Сергій Анатолійович, к.т.н., каф. «Матеріалознавство», тел.: +38 (050)-160-87-36, obmeninfoferg@ukr.net

Рябоштан Валентин Анатолійович, PhD каф. «Матеріалознавство», тел.: +38 (093)- 778- 69- 46, obibobbivalkinobi@gmail.com

Субботін Ярослав Олександрович, студент каф. «Технологія машинобудування та металорізальні верстати», тел.: 098-088-12-44, yasyasub676@gmail.com

Фесюков Сергій Олексійович, аспірант каф. «Матеріалознавство», тел.: 063-523-42-87, sergey.fesyukov@gmail.com

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Control of the size and distribution of residual macrostresses by rolling rollers

Abstract. To increase the fatigue strength of parts, surface plastic deformation (SPD) is used by rolling. This creates a residual stress state that affects the fatigue strength of parts. This paper shows the possibility of controlling the level and distribution of residual macrostresses in the surface layer of parts by rolling. This makes it possible to optimize the modes of PPD for critical, heavily loaded parts subjected to cyclic loads during operation.

Problem. Controlling the magnitude and distribution of residual macro-stresses, which will increase their stability during cyclic loading of parts and, as a result, increase the fatigue strength of parts after hardening of the PPD. **Goal.** Study of the formation of residual stress state and control of the magnitude and distribution of residual macro-stresses. **Methodology.** To solve this problem, macrostresses were determined by the X-ray method. The advantage of this method is

its localization, the ability to analyze the distribution of residual stresses in depth. It is the use of this advantage of the method that made it possible to identify features in the distribution of residual stresses on the surface and in the depth of the hardened layer of parts after rolling. **Originality.** The ability to control the level of residual stresses in the surface layer. **Practical value.** By changing the pumping modes, it is possible to ensure the required level of residual stresses on the surface and create the required residual stress distribution pattern over the depth, thereby increasing the efficiency of the SPD.

Key words: surface plastic deformation (SPD), roller rolling, X-ray thesometry, high-strength alloys, residual stresses.

Subbotina Valeriia¹, professor, Doctor of technical sciences, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0002-3882-0368, subbotina.valeri@gmail.com

Belozerov Valerii¹ PhD, Professor, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0002-7623-3658, belozerov.valerii@gmail.com

Subbotin Olexsandr¹, graduate student, ORCID: 0000-0002-9422-4480 subbotin.alex95@gmail.com

Volkov Oleg¹, Ph. D., Associate Professor at the department of materials science, ORCID: 0000-0001-8797-0322, volkovoleg1978@gmail.com

Knyazev Sergiy¹, PhD, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0001-6422-3658, obmeninfoferg@ukr.net

Ryaboshтан Valentyn¹, PhD, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0001-5826-5085, obibobbivalkinobi@gmail.com

Subbotin Yaroslav¹, student yasyasub676@gmail.com

Fesyukov Sergey¹, graduate student sergey.fesyukov@gmail.com

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kirpichova str., 2, Kharkiv, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Дослідження та фінансування здійснені в межах проєктів EU #3055 EURIZON "Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads" та NFRD ID: 2023.04/0036 "Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures".

"Research and funding were carried out within the projects: EU #3055 EURIZON 'Combined technologies of metal surface modification by micro-arc oxidation and boron plating for critical machine parts with high contact loads' and Research and NFRD ID: 2023.04/0036 "Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures".