

УДК 621.787.6.004
DOI: 10.12737/17091

А.В. Киричек, С.В. Баринов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОМУ ВЫКРАШИВАНИЮ

Поднят вопрос о значимости технологий гетерогенного упрочнения в промышленности. Описаны выполненные исследования новой технологии получения гетерогенной структуры с помощью метода поверхностного пластического деформирования – статико-импульсной обработки. Установлена взаимосвязь между параметрами гетерогенности и величиной сопротивле-

ния контактному выкрашиванию для сталей 45, 40X, 35XГСА.

Ключевые слова: равномерность упрочнения, деформирование, твердость, гетерогенно упрочненная структура, долговечность, статико-импульсная обработка.

A. V. Kirichek, S. V. Barinov

HETEROGENEOUS STRUCTURE PARAMETER EFFECT UPON RESISTANCE TO CONTACT SPALLING

At present time to increase surface layer life in machinery there is formed a heterogeneously strengthened structure representing alternate hard-tough areas. The method of static-pulse working (SPW) with surface plastic forming is a method promising enough for the heterogeneous structure formation in a surface layer. At SPW the plastic forming of material to be strengthened is carried out through an impulse load which is a consequence of rise at a blow in an impact system of a strain wave and controlled by the change of geometrical parameters in an impact system. The SPW allows creating a strengthened structure both uniformly, and heterogeneously. For a wider use of the heterogeneous strain strengthening of the SPW in industry there were developed the heterogeneity parameters

describing the distribution of hard-tough areas in the surface layer; there were carried out researches of the resistance to a contact spalling of heterogeneously strengthened samples of steel 45, steel X, steel 35 XGSA; there was carried out the analysis of the distribution of hard-tough areas in the surface layer of strengthened samples.

As a result of researches carried out for steel 45, steel 40X, steel 35XGSA there was defined a range of heterogeneity parameters conducive to the increase of their resistance to a contact spalling two ... six times more.

Key words: uniformity of strengthening, warping, hardness, heterogeneously strengthened structure, durability, static-pulse working.

Достаточно большой интерес для современной промышленности представляют материалы, сочетающие в себе несколько несопоставимых для обычных материалов свойств, например твердость и вязкость. Такие материалы называются гетерогенными или материалами с гетерогенной структурой. В отличие от композиционных материалов они имеют одинаковый химический состав, а гетерогенные свойства задаются в гомогенном материале путем применения термообработки (ТО) или химико-термической обработки (ХТО). Так, при изменении режимов лазерной закалки были получены сочетания различной твердости на поверхностных выступах и впадинах резьбы. Созданная гетерогенная структура позволила повысить усталост-

ную долговечность на 30...50 % [1]. Полученная гетерогенная структура после ХТО за счет нанесения лаковых масок на рабочие поверхности зубчатых колес позволила увеличить их контактную выносливость в 2...3 раза [5].

Применение поверхностного пластического деформирования (ППД) для создания гетерогенной структуры стало возможным с появлением статико-импульсной обработки (СИО). Данный способ, в отличие от известных методов ППД, позволяет обеспечить требуемый закон распределения твердых и вязких участков на большой глубине. Кроме того, применение деформационного упрочнения для получения гетерогенной структуры представляется более перспективным по сравнению с ТО и ХТО. Это связано с тем,

что ППД позволяет создавать плавный переход от участков с повышенной твердостью к участкам с низкой исходной твердостью, исключая возможность зарождения между ними микротрещин и дальнейшего разрушения.

Однако на сегодняшний момент технология машиностроения не дает технологических рекомендаций по режимам упрочнения и тем более по необходимой картине распределения в поверхностном слое твердых и вязких участков, обеспечивающих повышение долговечности. Это связано с малой изученностью процесса гетерогенного упрочнения и с отсутствием методики оценки формируемых твердых структур в поверхностном слое. Все это сдерживает более широкое распространение в промышленности предлагаемой технологии гетерогенного деформационного упрочнения.

Для расширения представлений о возможностях гетерогенных структур, полученных деформирующей СИО, и установления взаимосвязи между получаемыми сочетаниями твердых и вязких областей и формируемой долговечностью были проведены исследования на сталях 45, 40Х и 35ХГСА. Выбор материалов обусловлен тем, что сталь 45 является эталонной в машиностроении, а стали 40Х и 35ХГСА широко используются для создания тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях контактных циклических нагрузок.

Для реализации поставленных целей образцы из сталей 45, 40Х и 35ХГСА были подвергнуты СИО. СИО позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру. При СИО пластическое деформирование упрочняемого материала осуществляется импульсной нагрузкой, которая является следствием возникновения при ударе в ударной системе волн деформации, и управляется изменением геометрических параметров ударной системы. Статическая составляющая нагрузки практически не участвует в процессе упругопластического деформирования и предназначена для наиболее полного использования импульсной. В результате импульсного воздействия упрочненная поверхность формируется из пластических отпечатков, которые перекрывают друг друга в определенном

порядке. Степень перекрытия пластических отпечатков характеризуется коэффициентом перекрытия K . Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента для СИО в одно и то же место [2].

Долговечность образцов с гетерогенной структурой, полученных СИО, оценивается в условиях контактного циклического нагружения по величине сопротивления контактному выкрашиванию ΔI , позволяющей качественно и количественно оценить величину выкрашиваний на упрочненной поверхности относительно неупрочненной. Критерий ΔI является комплексным параметром, учитывающим изменение в процессе испытаний размеров следов дорожек катания шаров и площадь возникших на них выкрашиваний [5].

Результаты испытаний на долговечность в условиях контактного циклического нагружения показали, что у стали 45 сопротивление контактному выкрашиванию повышено в 4...6 раз при коэффициенте перекрытия пластических отпечатков $K=0,4$. Наиболее эффективные значения ΔI у сталей 40Х и 35ХГСА были получены при $K=0,3$ и составили соответственно 2...2,3 и 2,1...2,8 [3].

После исследования долговечности образцы с созданными гетерогенными структурами были разрезаны по середине упрочненной дорожки в направлении подачи инструмента для СИО. Для визуальной оценки распределения твердых и вязких участков по всему полученному сечению была измерена микротвердость. На полученных эпюрах распределения микротвердости (рис. 1) в зависимости от режимов СИО наблюдались разные чередования твердых и вязких участков как по глубине, так и в направлении подачи инструмента для СИО. Для оценки эпюр распределения микротвердости были введены численные характеристики, позволяющие описать распределение твердых и вязких участков в поверхностном слое, - параметры гетерогенности: относительная опорная твердость $L_{\Delta H}^h$ и относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$ [4].

Относительная опорная твердость $L_{\Delta H}^h$ представляет собой отношение суммы

длин участков с одной определенной степенью упрочнения на рассматриваемой глубине к базовой длине, на которой проводится измерение.

Относительное количество локальных упрочненных участков на базовой длине $N_{\Delta H}^h$ представляет собой отношение числа упрочненных участков $n_{\Delta H}^h$ со сте-

пенью упрочнения ΔH к базовой длине L , на которой проводится измерение.

На основании рассчитанных параметров гетерогенности и результатов испытаний на сопротивление контактному выкрашиванию были построены графики их взаимосвязи (рис. 2-4).

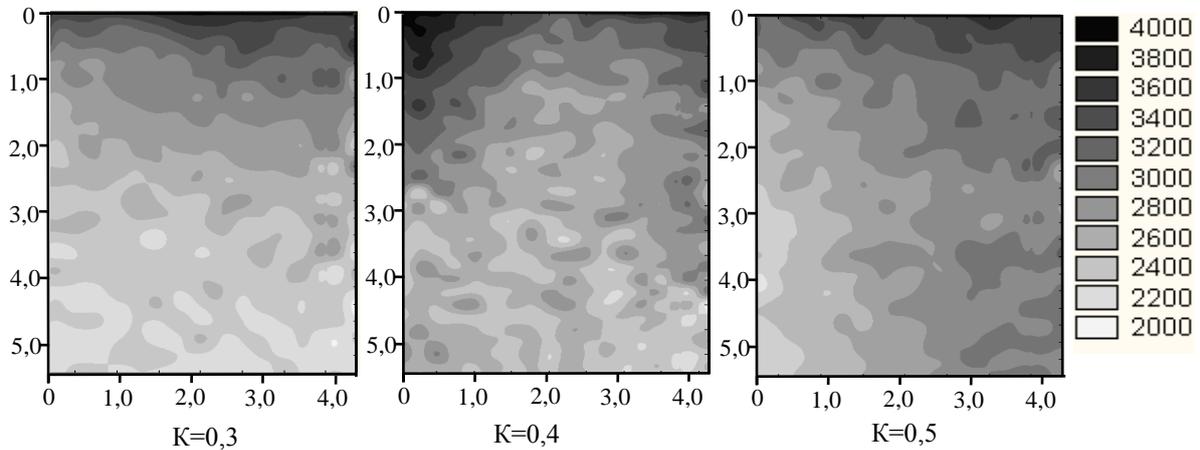


Рис. 1. Примеры эпюр распределения микротвердости (МПа) в поверхностном слое стали 40X

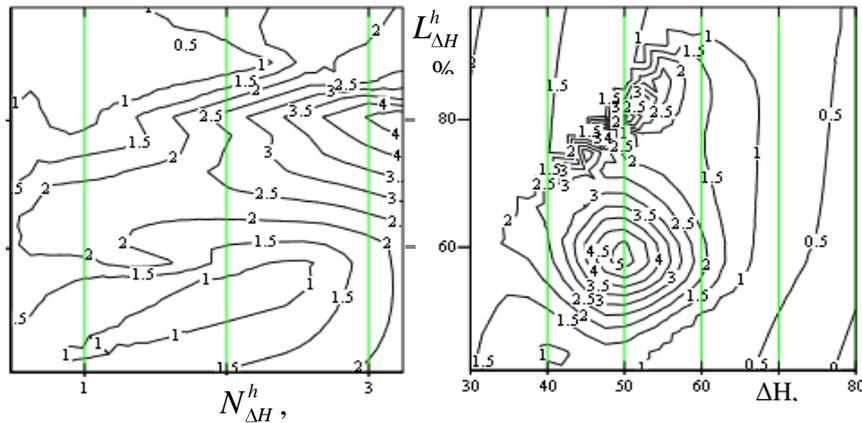


Рис. 2. Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию для стали 45

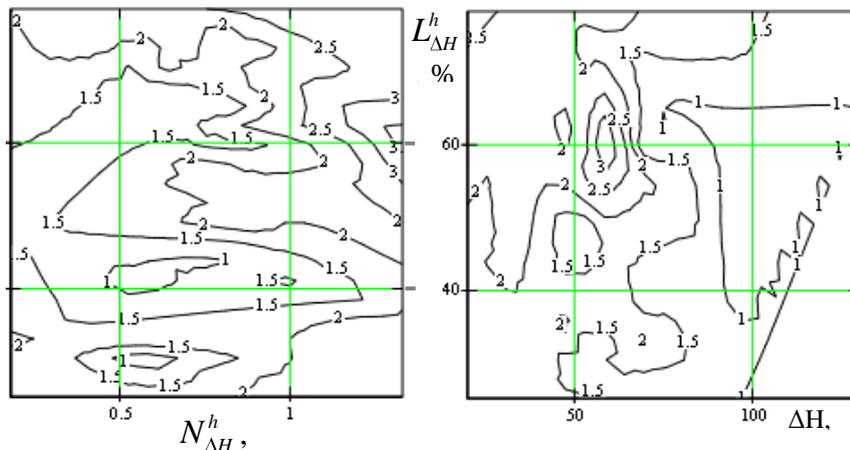


Рис. 3. Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию для стали 40X

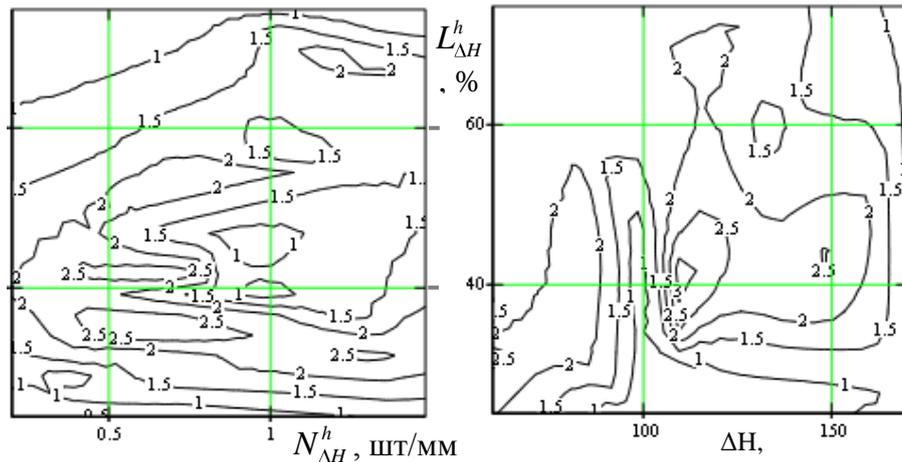


Рис. 4. Взаимосвязь параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию для стали 35ХГСА

Анализ графиков взаимосвязи параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию показал, что у стали 45 наибольшие значения ΔI 4...6 раз могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 45...55%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h$ от 55 до 70 % и $N_{\Delta H}^h$ от 2,5 до 3,1 шт./мм. Для стали 40Х наибольшие значения ΔI 2...2,3 раза могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 50...70%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h = 53...70$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,9...1,5$ шт./мм. Для стали 35ХГСА

наибольшие значения ΔI 2,1...2,8 раза могут быть достигнуты при преобладающей степени упрочнения ΔH 50...120%, если будут обеспечены $L_{\Delta H}^h = 30...50$ % и $N_{\Delta H}^h = 0,4...1,1$ шт./мм.

Обработка в программе *Statistica* данных взаимосвязи параметров гетерогенности с сопротивлением контактному выкрашиванию позволила получить следующие математические модели для сталей 45 (1), 40Х (2), 35ХГСА (3) соответственно:

$$\Delta I = 4,12727 - 0,086158\Delta H + 0,009446L_{\Delta H}^h + 1,15528N_{\Delta H}^h, \quad (1)$$

$$\Delta I = 1,306093 - 0,009794\Delta H + 0,009218L_{\Delta H}^h + 0,623352N_{\Delta H}^h, \quad (2)$$

$$\Delta I = 2,034601 - 0,002843\Delta H + 0,003638L_{\Delta H}^h - 0,260304N_{\Delta H}^h. \quad (3)$$

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что все параметры значимы; адекватность моделей для сталей 45, 40Х, 35ХГСА составила соответственно 91, 85 и 87%. Данные регрессии свиде-

Выводы:

1. Использование деформирующей статико-импульсной обработки для получения гетерогенной структуры является перспективной технологией.

2. Сопротивление контактному выкрашиванию может быть повышено за счет создания гетерогенной структуры СИО в сталях 45, 40Х, 35ХГСА соответственно в 4...6; 2...2,3 и 2,1...2,8 раза.

тельствуют об адекватности использования полученных математических моделей для определения параметров гетерогенности в зависимости от требуемой величины ΔI для сталей 45, 40Х, 35ХГСА.

3. Распределение твердых и вязких участков создаваемых гетерогенных структур может быть описано с помощью разработанных параметров гетерогенности.

4. Проведенный анализ позволил установить взаимосвязь между параметрами гетерогенности и величиной сопротивления контактному выкрашиванию для сталей 45, 40Х, 35ХГСА.

5. Выполненный регрессионный анализ взаимосвязи параметров гетерогенности и величины сопротивления контактно-

му выкрашиванию выявил значимость всех величин и установил их удовлетворительную адекватность.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №14-08-31263 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев, Д.Л. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно наклепанной структуры / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, С.В. Баринов // Тяжелое машиностроение. - 2010. - № 7. - С. 4-7.
2. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004.- 288 с.
3. Kirichek, A.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 756 (2015). – P. 65-69.
4. Kirichek A.V. Development of Parameters Describing Heterogeneous Hardened Structure / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 756 (2015). – P. 75-78.
5. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - №7. - С.9-15.
1. Soloviev, D.L., Durability increase of machinery through creation of structure cold-hardened heterogeneously / D.L. Soloviev, A.V. Kirichek, S.V. Barinov // *Heavy Engineering*. -2010. – No 7. – pp. 4-7.
2. Kirichek, A.V., Techniques and Equipment for Static-Pulse Working with Surface Plastic Forming / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.G. Lazutkin. – M.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 288.
3. Kirichek, A.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 756 (2015). – P. 65-69.
4. Kirichek A.V. Development of Parameters Describing Heterogeneous Hardened Structure / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 756 (2015). – P. 75-78.
5. Kirichek, A.V., Increase of machinery contact durability by heterogeneous strain strengthening with static-pulse working / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, S.V. Barinov [et alii] // *Strengthening Techniques and Coatings*. – 2008. – No 7. – pp. 9-15.

*Материал поступил в редколлегию
15.12.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор
Приокского государственного университета
Ю.С. Степанов*

Сведения об авторах:

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., профессор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Баринов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Автоматизированное проектирова-

Kirichek Andrey Viktorovich, D.Eng., Prof. on prospective development of Bryansk State Technical University, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Barinov Sergey Vladimirovich, Can.Eng., Assistant Prof., Head of the Dep. «Computer Aided Design of

ние машин» Муромского института (филиала) ФГБОУВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», e-mail: box64@rambler.ru.

Machines» of Murom Institute (Branch) FSBEI HE «Alexander and Nikolay Stoletov State University of Vladimir», e-mail: box64@rambler.ru.