

Наскевич В.Ю., Лещик С.Д., Калугин Ю. К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 40Х, ПОДВЕРГНУТЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Введение. Выход из строя деталей и узлов автомобильной техники более чем на 80% происходит в результате износа контактирующих поверхностей [1]. В связи с этим важнейшей задачей для научно-технического сообщества является повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей машин.

Существует ряд деталей, у которых процесс износа происходит в результате многократного деформирования микровыступов контактирующих поверхностей. Такой вид изнашивания носит усталостный характер. Такому виду износа подвержены подшипники качения и скольжения, шейки коленчатых валов, зубчатые передачи [2–3].

Для управления и прогнозирования процессом изнашивания деталей машин при контактом нагружении необходимо учитывать деформации, вызванные формоизменением рабочих поверхностей. В свою очередь, критерием разрушения контактной поверхности служит появление зон деформации в виде следов выкрашивания или единичного выкрашивания размером, превышающим 50 % малой полуоси пятна контакта [4–5].

Известно, что для увеличения работоспособности узлов, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, используют различные методы упрочнения: технологические, конструкционные, эксплуатационные. Они могут использоваться как отдельно, так и комплексно, дополняя друг друга. Таким образом, рабочие поверхности деталей машин получают различные эксплуатационные свойства.

Среди технологий упрочнения поверхностного слоя деталей машин можно выделить химико-термическую обработку (ХТО). Данная технология получила наибольшее распространение из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Поверхность может быть подвергнута закалке, тогда поверхностный слой приобретает высокую твердость (до 60 единиц по шкале Роквелла и более). Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм [6].

Одним из видов ХТО является технология поверхностного насыщения углеродом (цементация) и дальнейшая закалка поверхностного слоя. Изменение режимов процесса цементации и закалки позволяют получать на поверхности упрочняемых деталей различные глубины насыщенного углеродом слоя и процентного его содержания. Это приводит к различной твердости и износостойкости упрочняемых поверхностей [6]. При таком различии физико-механических свойств упрочняемых поверхностей теоретический метод расчета величины средних контактных напряжений оказывается недостаточно точным. Актуальной становится задача экспериментального определения средних контактных напряжений для обоснования конструктивно-технологических решений, проработки выбора материала для изготовления узлов и деталей машин, работающих в режиме контактного нагружения.

Целью проведенного исследования является обоснование эффективности высокоточных экспериментальных методов определения среднего контактного напряжения в поверхностном слое деталей, подвергнутых химико-термической обработке и оценке граничных условий при проведении испытаний на контактную выносливость металлических материалов.

Материалы и методы исследований. Начало пластического

течения металла характеризует величина среднего контактного напряжения q , равномерно распределенного на поверхности пятна контакта. Величина среднего контактного напряжения теоретически определяется по методике [5], согласно которой

$$q = \frac{P}{(l \cdot b)}, \quad (1)$$

где P – нормальная нагрузка, Н;

l, b – размер площадки контакта, мм.

Для теоретического определения среднего контактного напряжения размер площадки контакта определяют по формуле

$$b = 0,7979 \left(\frac{d \cdot \eta \cdot P}{l} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где η – коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел, вычисляемый по формуле:

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (3)$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов образца и контртела;

E_1 и E_2 – модули нормальной упругости материалов образца и контртела.

Для выявления разницы между теоретическим и экспериментальным методом определения среднего контактного напряжения было проведено исследование с применением современных измерительных средств. Применялись образцы из стали 40Х в виде цилиндрических заготовок диаметром 32 мм, высотой 10 мм. Шероховатость поверхности достигалась шлифованием до Ra 0,32 мкм. Химический состав стали 40Х приведен в таблице 1. Модуль упругости $E_{40X} = 21,5 \cdot 10^4$ МПа. Коэффициент Пуассона стали $\mu_{40X} = 0,3$.

Таблица 1. Химический состав в % стали 40Х ГОСТ 4543-71

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8-1,1	до 0,3	~97

В процессе измерений было использовано десять образцов. Пять образцов подвергли химико-термической обработке (цементации) в цементационной шахтной электропечи СШЦМ 8.20/9,5. Термообработку, применяемую для деталей токарного патрона, выполнили в соответствии с технологическим процессом, разработанным на предприятии ОАО «Белтапаз» г. Гродно. Режимы цементации: температура 920–940°C, время цементации – 9 часов. Глубина полученного слоя – 1,2–1,4 мм. Затем эти образцы подвергли объемной закалке в электропечи СНО 6.12.4/10 при температуре 840–880°C: время выдержки – 45–50 мин; охлаждение – в масле при температуре 20–500°C; масло И-12А ГОСТ 20799-88; отпуск заготовок до твердости 60HRC. Остальные образцы оставили без изменений.

Для получения отпечатка при вдавливании на поверхности образцов использовали цилиндр из высокопрочной керамики IS09 (рис. 1а)

Наскевич Василий Юрьевич, аспирант кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, e-mail: naskevich@mail.ru.

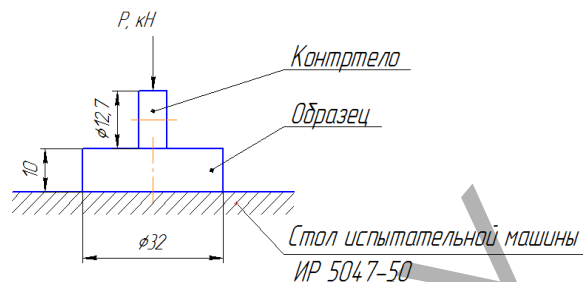
Лещик Сергей Дмитриевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Калугин Юрий Константинович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

размером диаметром 12,7 мм и высотой 7,94 мм. Модуль упругости керамики $E_{IS09} = 45,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона керамики $\mu_{IS09} = 0,21$. Твердость 94 HRA. Для предотвращения вылета цилиндра контртела применяли специальную оснастку (рисунок 16).

Для вдавливания цилиндра в поверхность заготовок использовали разрывную машину ИР 5047-50 универсального назначения с электронным силоизмерителем на сжатие при нагрузке от 1,0 до 15 кН. Перед испытаниями на исследуемую поверхность наносили сажевое покрытие. Изображение установки и схемы нагружения образца приведены на рисунках 1в, г, д. После снятия нагрузки измеряли площадь отпечатка, оставшегося на поверхности образца с использованием микроскопа «Neophot».



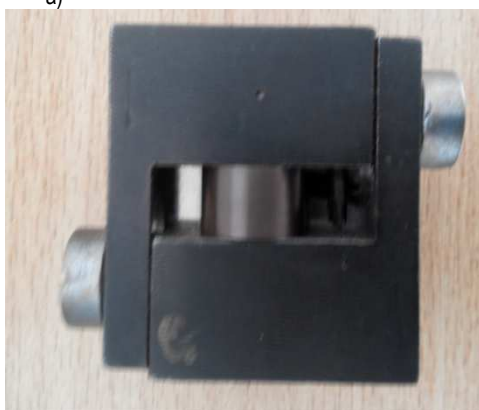
д)

а) цилиндр контртела из высокопрочной керамики IS09; б) закрепление цилиндра контртела в оснастке; в) установка заготовки и цилиндра контртела на столе испытательной машины; г) установка для проведения испытаний; д) общая схема испытаний

Рис. 1. Испытания для определения средних контактных напряжений на универсальной разрывной машине ИР 5047-50



а)



б)



в)



г)

Результаты и обсуждение. Экспериментальные ($b_э$, мм) и теоретические значения размеров площадки контакта (b , мм) образцов из стали 40Х без предварительной обработки и после обработки (цементация + закалка) приведены в таблице 2. Изображения размеров экспериментальных ($b_э$, мм) площадок контакта при нагрузке 15кН для образцов без предварительной обработки и с ХТО приведены на рисунке 2. Значения среднего контактного напряжения $q_э$ (экспериментальные) и q (теоретические) образцов из стали 40Х без предварительной обработки и после обработки (цементация + закалка) приведены на рисунке 3.

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические размеры площадки контакта образцов стали 40Х

Нагрузка P , Н	без предварительной обработки	предварительная ХТО + закалка	b , мм
	$b_э$, мм	$b_э$, мм	
1000	0,07	0,043	0,08
2000	0,08	0,063	0,11
3000	0,10	0,086	0,13
4000	0,12	0,095	0,16
5000	0,13	0,096	0,17
6000	0,14	0,097	0,19
7000	1,54	0,362	0,21
9000	2,05	0,788	0,24
12000	2,25	0,808	0,27
15000	2,28	0,855	0,31

Из представленных значений в таблице 2 видно, что экспериментальные результаты размеров пятна контакта в зависимости от приложенной нагрузки в значительной степени отличаются от значений, рассчитанных по формулам (2), (3). Теоретические значения площадки контакта соответствуют значениям теории упругого контакта (теория Герца). На начальном этапе при нагрузке 1000 Н разница расчетной и теоретической величины площадок контакта практически одинакова, а при достижении нагрузки 6000–7000 Н происходит его скачкообразное увеличение, что может говорить о начале пластических деформаций. Расчетное значение размеров площадки контакта в соответствии с методикой измерений [5] определяет усредненную величину, что в условиях усталостного характера изнашивания недостаточно. Требуется более подробное описание процесса формоизменения поверхностного слоя.

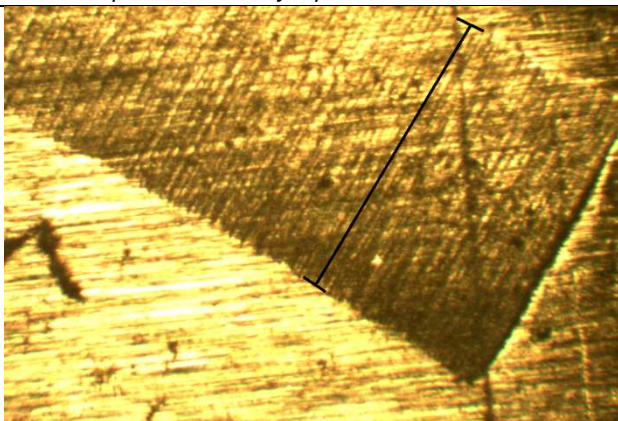
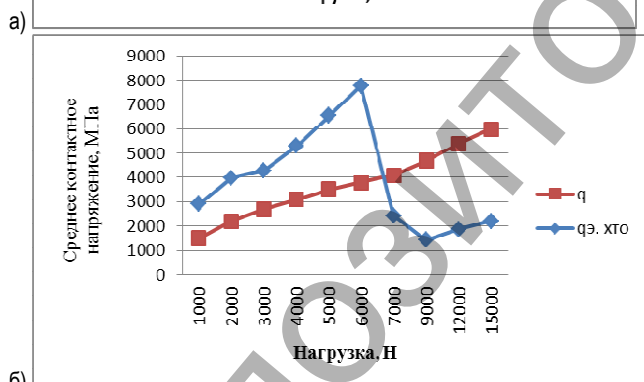
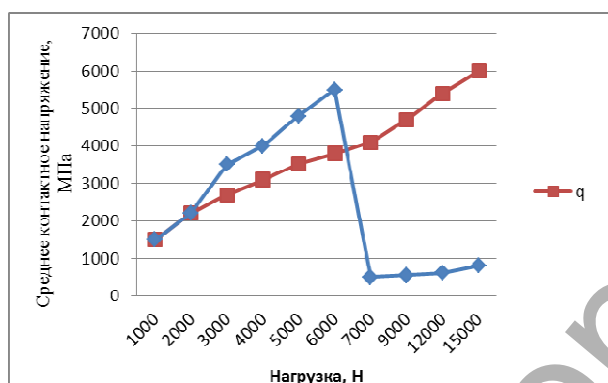


Рис. 2. Изображения экспериментальной площадки контакта при нагрузке 15 кН на образце без предварительной обработки

На снимке показан профиль площадки контакта образца с поверхностью контртела, с четко выраженной границей между частью поверхности, не подвергнутой воздействию нагрузки, и деформированной зоной.



а) без термообработки; б) с использованием термообработки (ХТО + цементация)

Рис. 3. Графики экспериментальной и теоретической зависимости среднего контактного напряжения от нагрузки для образцов из стали 40Х

Из представленных графиков видно, что экспериментальная зависимость среднего контактного напряжения от приложенной нагрузки отражается в виде линии, состоящей из трех участков. Первый участок соответствует только упругим или упругим и микропластическим деформациям в соответствии с теорией упругого контакта (Герца). Второй и третий линейный участок соответствуют макропластическим деформациям. Точка перегиба между вторым и третьим участком соответствует началу поверхностного пластического упрочнения, когда при росте нагрузки не происходит пропорционального увеличения макропластических деформаций. Перегиб, соответствующий предельному контактному напряжению q^* для образца из стали 40Х в состоянии поставки (точка перегиба между первым и вторым участком), приходится на 5500–6000 МПа, а для образца, подвергнутого химико-термической обработке (цементация + закалка), перегиб приходится на 7500–8000 МПа.

Закключение. В результате выполненного исследования было установлено: упругие деформации незначительно зависят от предварительной химико-термической обработки и проявляются для стали 40Х, до достижения нагрузки на поверхность образца, равной 6000–7000 Н. В свою очередь, выявленный эффект резкого возрастания геометрических размеров площадки контакта связан с макропластическими изменениями поверхностного слоя. Угловые коэффициенты участков существенно различаются: точка перегиба между участком упругих и макропластических деформаций соответствует предельному контактному напряжению.

Доказано влияние предварительной обработки на значение предельного контактного напряжения. Применение химико-термической обработки позволит увеличить предельное контактное напряжение для стали 40Х на 20–25%, что говорит, о существенном влиянии структурных составляющих поверхностного слоя. Известно, что после ХТО структура имеет выраженную карбидную сетку с перлитной матрицей и трансформируется в мартенситную матрицу с остаточным аустенитом и избыточными карбидами в результате закалки и отпуска.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов. – М., 2005.
2. Solazzia, L. Vibration based diagnostics on rolling contact fatigue test bench / L. Solazzia, C. Petrogallia, M. Lancinia // Procedia Engineering 10 (2011) 3465–3470.
3. Ki, M.L. Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels / M.L. Ki, A.P. Andreas // Wear 259 (1–6) (2005) 391–399.
4. Hernandez, F.C.R. Mechanical properties and wear performance of premium rail steels / F.C.R. Hernandez, N.G. Demas, D.D. Davis // Wear 263 (2007) 766–772.
5. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость: Р 50-54-30-87. Утверждены приказом ВНИИМШ № 379 от 8.12.1987
6. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов: учеб. пособие / С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.

Материал поступил в редакцию 09.12.15

NASKEVICH V.U., LESHCHIK S.D., KALUGIN U.K. Theoretical and experimental determination of contact stress medium-tion of the surface layer of machine parts made of steel 40X-th you put our chemical and heat treatment

The presents a theoretical and experimental determination of the average contact stress of the surface layer of machine parts. For increased performance, capacity units operating under high contact loads, use different methods of hardening. Among the technologies of hardening surfaces of machine parts one of the most common is a chemical heat treatment. The difference between the physical and mechanical properties of hardened surfaces, theoretical method of calculating the value of the average contact stress is not accurate enough. Becomes relevant the question of experimental determination of the average contact stress to justify structural and technological solutions. Determine the average contact stress for samples of steel 40X without heat treatment and chemical heat treatment. Depending on experimental values established contact area of the sample and the opposing member under a load of 1.0 to 15 kN. Determined experimental and theoretical dependence of the average contact stress of the applied load. It revealed the formation of a few specific areas of conformity: resilient Microplastic, macroplastic deformations.