

УДК 621.7.015:539.431

Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, д-р техн. наук,
В.С. Антонюк, д-р техн. наук, С.П. Выслоух, канд. техн. наук,
Д.А. Котляр, канд. техн. наук, А.В. Кравчук, канд. техн. наук,
Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СТАЛИ ХВСГ

Приведені результати досліджень впливу виду механічної обробки і інструментального матеріалу на структурний стан поверхневого шару та втомну міцність сталі ХВСГ при механічній обробці. Обробка інструментом із гексаніту-Р в поверхневому шарі для α - і γ -фаз супроводжується тільки стискаючими залишковими напруженнями, а абразивна обробка призводить до розтягуючих напружень I-роду. Збільшення швидкості різання при обробці інструментом із гексаніту-Р від 50 до 200 м/хв не призводить до суттєвої зміни втомної міцності.

Приведены результаты исследований влияния вида механической обработки и инструментального материала на структурное состояние поверхностного слоя и усталостную прочность стали ХВСГ при механической обработке. Обработка инструментом из гексанита-Р в поверхностном слое для α - и γ -фаз сопровождается только сжимающими остаточными напряжениями, а абразивная обработка приводит к растягивающим напряжениям I-рода. Увеличение скорости резания при обработке инструментом из гексанита-Р от 50 до 200 м/мин не приводит к существенному изменению усталостной прочности.

Results of machining kind influence researches and a tool material on a structural condition of surface steel layers of ХВСГ are resulted at machining. Advantage of turning processing by cutters from geksanit-R in comparison with grinding process is shown. Processing by geksanit-R tool in a surface layer for α - and γ - phases is accompanied only by compressing residual pressure while abrasive processing promotes occurrence of stretching pressure of an I-type in α - a phase of structure of high-speed admission. Increase of cutting speed from 50 to 200 m/mines at treatment instrument by geksanit-R does not cause the substantial change of resistance a fatigue.

Вступлення.

Известно, что механическая обработка вызывает пластическую деформацию, нагрев в поверхностном слое материала обрабатываемой детали и сопровождается структурными изменениями, возникновением неравномерных по глубине и значению остаточных деформаций и напряжений. При этом изменения в поверхностном слое зависят от величины температуры и давления в зоне резания, а также от химического состава и исходной структуры материала [1].

*© Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк,
С.П. Выслоух, Д.А. Котляр, А.В. Кравчук, 2015*

Неровности поверхности детали, структура, фазовый и химический состав поверхностного слоя влияют на ее физико-механические и эксплуатационные свойства, поскольку при эксплуатации поверхностный слой подвергается наиболее сильному воздействию и разрушение детали в большинстве случаев начинается с поверхности. Особенно это касается деталей, работающих в условиях циклических и знакопеременных нагрузок. Наличие на их поверхности отдельных дефектов и неровностей способствуют возникновению субмикроскопических нарушений целостности металла поверхностного слоя и его разрыхления, что является первопричиной образования усталостных трещин.

При изготовлении ответственных деталей окончательной операцией часто является шлифование, однако, согласно [2], процесс шлифования, как правило, приводит к снижению сопротивления усталости, что обусловлено возникновением при обработке растягивающих остаточных напряжений. Грубая токарная обработка также снижает сопротивление усталости конструкционных и инструментальных сталей из-за худшей микрогеометрии поверхности. Однако тонкое точение с малыми подачами позволяет получить поверхность с хорошей микрогеометрией, меньшим числом дефектных мест (задилов, трещин, рваных мест) и наличием упрочняющего эффекта.

Наиболее существенное влияние токарной обработки на выносливость инструментальных легированных сталей оказывают величина подачи, радиус закругления резца, передний угол и скорость резания [3]. Изменение глубины резания мало влияет на сопротивление усталости сталей, поскольку микрогеометрия обработанной поверхности не существенно зависит от указанного параметра; а некоторое возрастание наклепа при увеличении глубины резания компенсируется ростом остаточных напряжений растяжения [4].

Применение сверхтвердых инструментальных материалов, на основе вюрцитного нитрида бора – гексанита, которые имеют высокую теплопроводность, способствует формированию остаточных напряжений сжатия и, как следствие, повышению усталостной прочности обработанных материалов [5, 6]. Однако вопрос использования нитридной керамики при обработке инструментальных легированных сталей точением и шлифованием исследован недостаточно.

Цель работы.

Исследование особенностей влияния технологических параметров механической обработки – инструментального материала и режимов на сопротивление усталости и структурное состояние поверхностных слоев инструментальной легированной стали ХВСГ.

Методика исследования.

Для изучения особенностей влияния вида инструментального материала на структурное состояние проведены исследования поверхностных слоев стали ХВСГ (ГОСТ 5950-73) твердостью HRC 54...56, полученных при шлифовании абразивными кругами и при точении резцами из гексанига-Р. Технологический процесс изготовления образцов состоял из резки круглого проката на заготовки, предварительной токарной, получистовой и чистовой их обработки. Для исследования влияния процесса шлифования образцы из стали ХВСГ изготавливали в виде цилиндров высотой 10 мм и диаметром 50 мм, а для процесса точения – длиной 250 мм, которые закаливали при температуре 850 °С (с охлаждением в масле) и отпускали при температуре 200 °С на воздухе.

Шлифование проводили на круглошлифовальном станке 3Б12 абразивными кругами: 1А1 250х16х76 63С 6 СМ1К; с режимами обработки: число оборотов круга – 2800 об/мин, число оборотов образца – 400 об/мин.

Точения осуществляли на токарном станке мод. 16К20 резцами из гексанига-Р с режимами обработки – скорость резания $V = 20, 40, 80, 160$ и 250 м/мин, подача $s = 0,07$ мм/об и глубина резания $t = 0,25$ мм.

Структурное состояние поверхностных слоев образцов оценивали по характеру изменения микротвердости, фазового состава, структурного и напряженного состояния фиксированных фаз методом послойного рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3 в Fe Ka-излучении.

Исследования микротвердости поверхностных слоев образцов проводили на микротвердомере мод. ПМТ-3 при нагрузке 0,2 Н и 0,5 Н.

Количество остаточного аустенита (f_γ) в исследуемых образцах определяли по данным измерения интегральной интенсивности рентгеновских линий (110) и (111) α и γ -фазы с учетом фактора повторяемости:

$$f_\gamma = \frac{S_\gamma}{0,66 \cdot S_\alpha + S_\gamma} \cdot 100\% \quad (1)$$

где S_α ; S_γ – интегральная интенсивность рентгеновских линий α и γ -фазы, соответственно. Численные значения S_α и S_γ определялись путем планиметрирования соответствующих линий.

Напряжения I-рода в поверхностных слоях оценивались рентгенографически как сумма главных напряжений ($\sigma_1 + \sigma_2$) по формуле:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{\mu} \cdot ctg\Theta \cdot \Delta\Theta \quad (2)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; $\Delta\Theta = \Theta - \Theta_0$ – разность углов K_α – компонентов α и γ фаз после механической обработки (Θ) и исходной (Θ_0).

Усталостные испытания образцов проводились в условиях консольного изгиба с вращением. Частота изменения нагрузки составляла – 15,0 Гц, база испытаний – 10 млн. циклов. Для построения кривой усталости испытывалось не менее 15 образцов, обработанных по принятому режиму обработки. Полученные в результате расчета средние значения $\bar{\sigma}$, $\lg \bar{N}_p$, среднеквадратичные отклонения значений σ_i и $\lg N_{p_i}$, коэффициент корреляции и другие являются исходными для получения корреляционного уравнения – уравнения кривой усталости:

$$\lg N_p = A + M\sigma \quad (3)$$

где N_p – среднее число циклов до разрушения образца при напряжении σ ; A, M – коэффициенты.

Обсуждение результатов.

Исследования микротвердости образцов в зависимости от глубины слоя при шлифовании абразивным кругом и точении резцом из гексанита-Р показали, что глубина зоны вторичной закалки уменьшается с увеличением теплопроводности обрабатываемого инструментального материала. При этом зона высокотемпературного отпуска находится на глубине 30-650 мкм для абразивного круга, 30-300 мкм для круга из гексанита-А, и 8-12 мкм в случае точения резцом из гексанита-Р.

Таким образом, при снижении температуры в зоне обработки глубина нарушенного слоя уменьшается и становится минимальной для поверхности обработанной резцом из гексанита-Р.

Результаты измерения остаточного аустенита после шлифования абразивным кругом и точения резцом из гексанитом-Р представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка глубина нарушенной концентрации аустенита меньше в несколько раз глубины нарушенной микротвердости и составляет в случае обработки абразивным кругом – 120 мкм, а резцом из гексанита-Р из – 80 мкм.

Заметные изменения концентрации остаточного аустенита при точении резцом из гексанита-Р происходят в диапазоне $V = 20-80$ м/мин. Это можно связать с процессом налипания обрабатываемого материала на резец, описанным в работах [7, 8].

$f_{T, \%}$

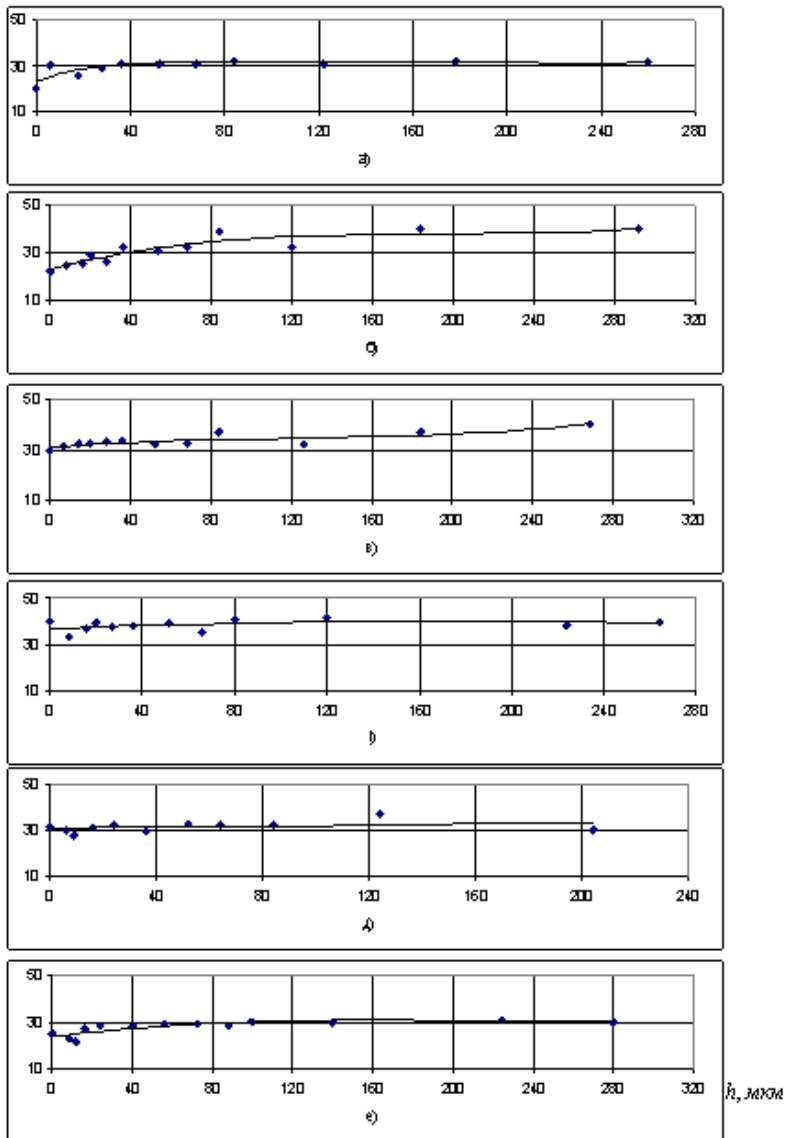


Рисунок 1 – Изменение остаточного аустенита по глубине поверхностного слоя при резании со скоростью: (а) – 20 м/мин; (б) – 40 м/мин; (в) – 80 м/мин; (г) – 160 м/мин; (д) – 250 м/мин и (е) – шлифовании абразивным кругом

Структурное состояние поверхностного слоя исследуемой стали при резании гексанитом-Р (рис. 2, а-д) характеризуется наличием зоны сжимающих напряжений в α - и γ -фазах, максимальных на поверхности образцов. Дальнейший характер изменения напряжений по глубине для α - и γ -фаз различается и зависит от скорости резания.

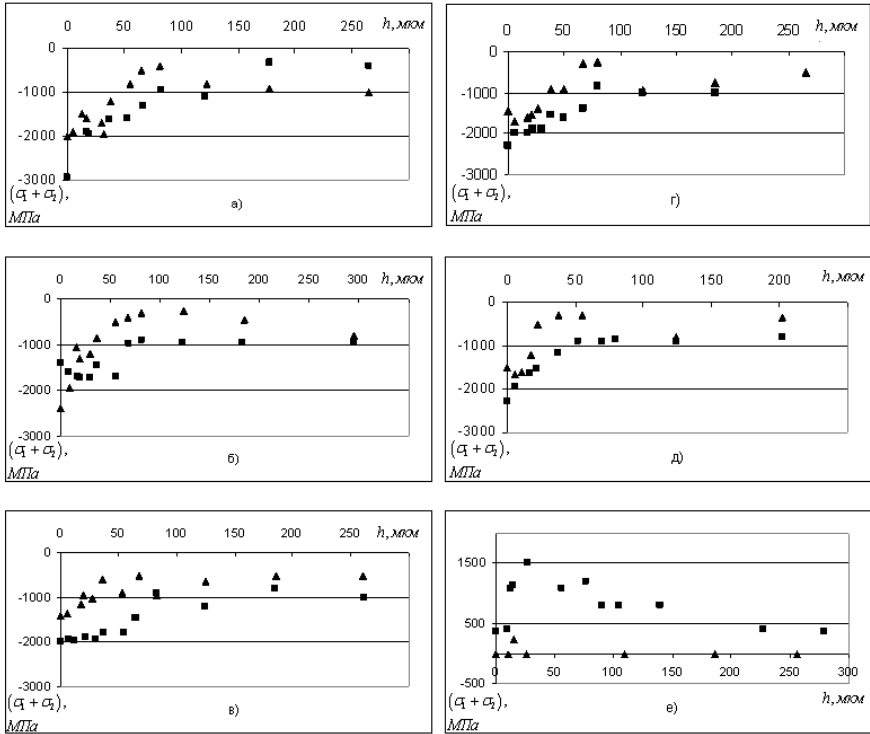


Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений I-го рода по глубине поверхностного слоя при скорости резания: (а) – 20 м/мин; (б) – 40 м/мин; (в) – 80 м/мин; (г) – 160 м/мин; (д) – 250 м/мин и (е) – шлифовании абразивным кругом (■ – γ -фаза, ▲ – α -фаза)

При увеличении скорости резания зона интенсивного снижения уровня остаточных напряжений в γ -фаза сокращается до 60 μm . Для α -фазы область интенсивного снижения напряжений также заканчивается на глубине 80 μm , но при этом максимальные значения напряжений на поверхности значительно превышают аналогичные величины для γ -фазы и не снижаются до нуля.

Характерной особенностью процесса шлифования абразивным кругом (рис. 2, е) является возникновение растягивающих напряжений I-рода в

γ-фазе структуры скоростного отпуска, распространяющихся по глубине исследования. Их максимальное значение по критерию ($\sigma_1 + \sigma_2$) достигается на глубине 30-50 мкм от поверхности. В α-фазе имеют место небольшие растягивающие напряжения, распространяющиеся на глубину до 40 мкм.

Для испытаний на усталость было изготовлено четыре партии образцов. Первая – обрабатывалась шлифовальным кругом по следующему режиму: число оборотов круга – 2800 об/мин, число оборотов образца – 400 об/мин; вторая, третья и четвертая – гексанитом-Р при скорости резания $V = 50, 100$ и 200 м/мин. соответственно; глубина резания и подача для последних трех партий оставались постоянными и равными $t = 0,25$ мм $S = 0,07$ мм/об. Результаты испытаний на усталость указанных выше партий образцов стали ХВСГ представлены на рис. 3.

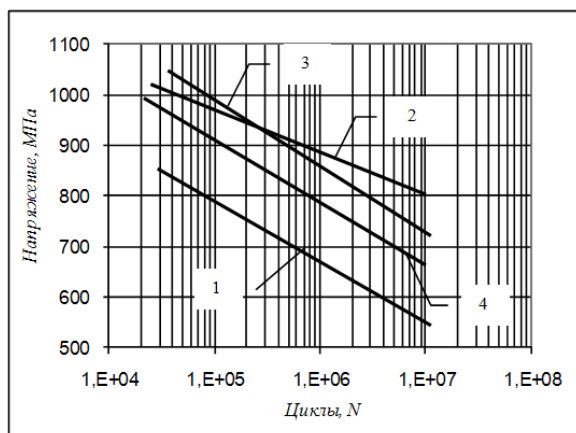


Рисунок 3 – Кривые усталости образцов из стали ХВСГ: шлифование абразивным кругом - (1); точение гексанитом-Р со скоростью $V = 50$ (2), 100 (3) и 200 (4) м/мин

Параметры кривых усталости, значения коэффициентов корреляции и ограниченных пределов усталости приведены в таблице. Анализ результатов испытаний показывает, что на принятой базе испытаний сопротивление усталости исследуемого материала характеризуется лишь наклонным участком кривой усталости – предел кривой усталости смещен в область больших долговечностей. Кривая усталости образцов четвертой партии (200 м/мин.) расположена ниже кривых 2-й и 3-й партий и ограниченный предел выносливости ниже на 10 %, чем для 2-й партии.

Выносливость шлифованных образцов существенно ниже выносливости образцов после точения гексанитом-Р. Ограниченный предел выносливости

для первой партии (560 МПа) на 32% ниже, чем для 2-й партии. Это связано с тем что в процессе резания гексанитом-Р в поверхностных слоях стали проходит скоростной отпуск под напряжением, при котором возникают сжимающие остаточные напряжения 1-го рода в α - и γ -фазах, замедляется распад остаточного аустенита. Сочетание равномерно распределенных хрупких и вязких структурных составляющих в поверхностном слое способствует повышению выносливости стали ХВСГ. При шлифовании абразивным кругом возникают растягивающие напряжения 1-го рода в γ -фазе, частично распадается остаточный аустенит и повышается степень его наклепа.

Таблица – Результаты усталостных испытаний образцов стали ХВСГ в условиях консольного изгиба с вращением

№ партии	Вид чистовой обработки	Коэффициенты уравнений кривой усталости		Предел выносливости σ_{-1} , МПа
		<i>A</i>	<i>M</i>	
1	Шлифование абразивным кругом	12,09	-0,0089	660
2	Точение, резец из гексанита-Р V = 50 м/мин	16,07	-0,01126	827
3	Точение, резец из гексанита-Р V = 100 м/мин	12,76	-0,00776	770
4	Точение, резец из гексанита-Р V = 200 м/мин	12,27	-0,00775	735

Выводы.

Таким образом, проведенные исследования точения резцами из гексанита-Р и шлифования абразивным кругом инструментальной легированной стали ХВСГ показали следующее:

- с увеличением теплопроводности инструментального материала сужается зона структурных изменений, происходящих в поверхностном слое обрабатываемого материала, она минимальна при точении резцами из гексанита-Р;

- количество остаточного аустенита при обработке резцами из гексанита-Р минимально в диапазоне скоростей резания 20-80 м/мин.;

- совместное влияние давления и температуры в процессе скоростного резания приводит к уменьшению степени наклепа γ - фазы в поверхностном слое;

- обработка инструментом из гексанита-Р для α - и γ -фаз в поверхностном слое сопровождается только сжимающими остаточными напряжениями, в то время как абразивная обработка способствует возникновению растягивающих напряжений I-рода;

- процесс точения резцами из гексанита-Р повышает предел выносливости по сравнению со шлифованием абразивным кругом на 30%, при этом увеличение скорости резания от 50 до 200 м/мин не приводит к существенному изменению сопротивления усталости.

Список использованных источников: 1. Урядов С.А. Влияние технологий обработки на сопротивление усталости деталей машин / С.А. Урядов // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – №9. – с.8-11. 2. Казаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М: Высшая школа, 1991, 320 с. 3. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. П. Ягодкин. М.: Машиностроение, 1988. – 238 с. 4. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. Изд-во: Наука, 2003. – 257 с. 5. Приймачук В.Л., Божко А.В. Овенесян А.О. Теплофизические свойства разных модификаций нитрида бора / В.Л. Приймачук, А.В. Божко, А.О. Овенесян // Порошковая металлургия.–1983.–№ 8.– С. 80-82. 6. Волкогон В.М., Котляр Д.А. і ін. Вплив попередньої підготовки порошків BNв до спікання на основні характеристики процесу обробки сталі ШХ15 в режимі безперервного різання / В.М. Волкогон, Д.А. Котляр, С.К. Аврамчук, А.В. Кравчук, В.С. Антонюк // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць.– Харків НТУ «ХПІ». – 2010.– Вип. 1.– С. 35-44. 7. Постнов, В.В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности / В.В. Постнов, Б. У. Шарипов, Л. Ш. Шустер. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1988.–224 с. 8. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин Текст. / А. Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000.– 318 с

Bibliography (transliterated): 1.Urjadov S.A. Vlijanie tehnologij obrabotki na soprotivlenie ustalosti detalej mashin / S.A. Urjadov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2009. – №9. – s.8-11. 2.Kagaev V.P., Drozdov Ju.N. Prochnost' i iznosostojkost' detalej mashin.- M: Vysshaja shkola, 1991, 320 s. 3.Sulima, A. M. Poverhnostnyj sloj i jekspluatacionnyje svojstva detalej mashin / A. M. Sulima, V. A. Shulov, Ju. P. Jagodkin. M.: Mashinostroenie, 1988. - 238 s. 4.Terent'ev V.F. Ustalost' metallicheskijh materialov / V.F. Terent'ev. Izd-vo: Nauka, 2003. – 257 s. 5.Prijmachuk V.L., Bozhko A.V. Ovenesjan A.O. Teplofizicheskie svojstva raznyh modifikacij nitrída bora / V.L. Prijmachuk, A.V. Bozhko, A.O. Ovenesjan // Poroshkovaja metallurgija.–1983.–№ 8.– S. 80-82. 6.Volkogon V.M., Kotljár D.A. і ін. Vpliv poperedn'oi pidgotovki poroshkiv BNv do spikannja na osnovni harakteristiki procesu obróbki stali ShH15 v rezhimi bezperernogo rizannja / V.M. Volkogon, D.A. Kotljár, S.K. Avramchuk, A.V. Kravchuk, V.S. Antonjuk // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. naukovyh prac'.– Harkiv NTU «HPÍ». – 2010.– Vip. 1.– S. 35-44. 7.Postnov, V. V. Processy na kontaktnyh poverhnostjáh, iznos rezhushhego instrumenta i svojstva obrabotannoj poverhnosti / V. V. Postnov, B. U. Sharipov, L. Sh. Shuster. Sverdlovsk: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 1988.–224 s. 8.Suslov, A. G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin Tekst. / A. G. Suslov. M.: Mashinostroenie, 2000.– 318 s

Поступила в редколлегию 10.07.2015