

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.941

Л. Н. Девин, А. А. Осадчий (г. Киев)

Повышение эксплуатационных характеристик резцов из КНБ путем увеличения их демпфирующих свойств

Разработана конструкция инструмента со специальными вставками из демпфирующих материалов, имеющего повышенную способность гашения колебаний. Исследовано влияние демпфирующих свойств на амплитуду колебаний, стойкость резцов из КНБ и шероховатость обработанной поверхности.

Ключевые слова: колебания, демпфирующие свойства, кубический нитрид бора, логарифмический декремент колебаний, износ, виброускорение, чистовое точение, закаленная сталь.

В современном машиностроении повышение эффективности механической обработки и качества обработанной поверхности деталей достигается различными путями. Одним из наиболее перспективных является влияние на динамические процессы, происходящие при лезвийной обработке. Это в первую очередь касается колебаний технологических систем. Особенно часто колебания возникают в процессе точения труднообрабатываемых закаленных сталей высокой твердости и при использовании режущих пластин с большим радиусом округления вершины резца, круглых пластин или при косоугольном точении безвершинным инструментом. В настоящее время все шире при обработке таких материалов применяют инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ). Чистовая токарная обработка закаленных сталей инструментом из КНБ позволяет в некоторых случаях отказаться от шлифования. В то же время, исследованиями отечественных и иностранных ученых установлено, что стойкость инструмента и качество обработанной поверхности деталей существенно зависят от амплитуды колебаний во время обработки. Колебания при резании приводят к преждевременному износу или разрушению дорогого режущего инструмента, а также снижению точности и увеличению шероховатости обработанной поверхности. Поэтому борьба с вибрациями особенно важна в процессах чистового точения.

Существует несколько методов уменьшения вибраций при резании. Среди наиболее распространенных – использование виброгасителей, нанесение на

© Л. Н. ДЕВИН, А. А. ОСАДЧИЙ, 2012

режущую пластинку покрытий, использование державок инструмента из материалов с высокими демпфирующими свойствами [1]. Преимущество гашения колебаний с помощью материалов высокого демпфирования состоит в простоте (отпадает надобность в специальных довольно сложных виброгасящих приспособлениях), практическая независимость эффекта демпфирования от частоты и, как правило, широкая область рабочих температур [2].

Целью данной работы было исследование возможности применения в конструкции инструмента демпфирующих элементов из новых материалов с высокими демпфирующими свойствами для гашения колебаний при чистовом точении закаленных сталей, а также установление влияния этих элементов на эксплуатационные характеристики резца из КНБ.

На основе опыта эксплуатации резцов из КНБ авторами была разработана конструкция инструмента, который содержал элементы из высокодемпфирующих материалов (рис. 1) [3].

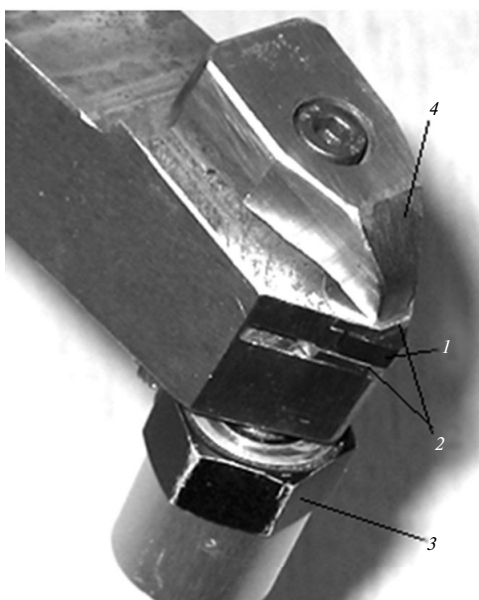


Рис. 1. Резец со вставками из высокодемпфирующих материалов: 1 – режущая пластина из КНБ; 2 – вставки из демпфирующего материала; 3 – акселерометр; 4 – прихват.

Квадратную режущую пластину из КНБ располагали между двумя вставками из демпфирующего материала и прижимали прихватом. Виброускорения при точении измеряли с помощью акселерометра.

Демпфирующие свойства материала исследовали с помощью резонансного метода, анализируя амплитудно-частотный спектр колебаний вставок и оценивали, используя логарифмический декремент колебаний $\delta = \frac{\pi}{Q}$, здесь

Q – добротность, характеризующая потерю механической энергии колебаний:

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{f_{\text{в}} - f_{\text{н}}},$$

где f_0 – резонансная частота; B – ширина резонансного пика, определенная на высоте $0,707 \cdot U_{\text{max}}$; $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ – верхнее и нижнее значения частот площадки резонансного пика на высоте $0,707 \cdot U_{\text{max}}$; U – амплитуда сигнала (рис. 2).

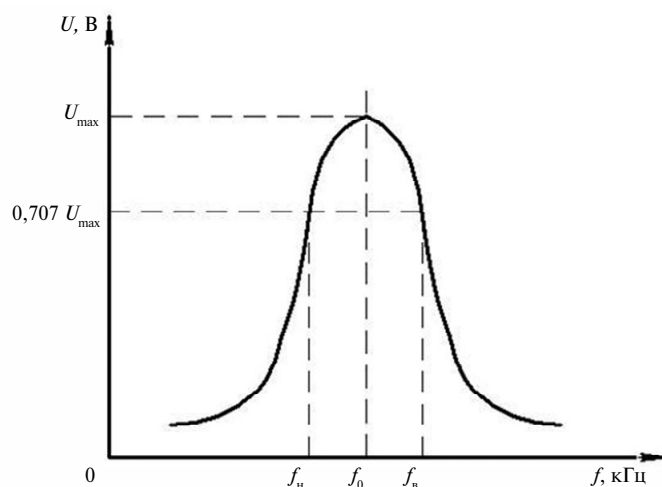


Рис. 2. Резонансный пик амплитудо-частотного спектра колебаний вставки.

Для исследования демпфирующих свойств материалов в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ) была разработана установка на базе измерительной стойки прибора “Звук-107” [4], состоящая из анализатора спектра СК4-59, широкополосного усилителя УЗ-32, согласующего усилителя, аналогово-цифрового преобразователя ADA 1406 и персонального компьютера.

Предварительную обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного пакета PowerGraph 3.3 Professional [5].

Испытывали специально изготовленные пластины диаметром 10 мм и высотой 1,8 мм, поверхности которых шлифовали до шероховатости $Ra \leq 0,64$ мкм.

Были определены демпфирующие характеристики твердых сплавов, чугуна, литого и порошкового (авибрит) никелида титана TiNi [6], трехфазных керамик Ti-Al-C и Ti-Si-C [7] и других материалов (табл. 1). Установлены высокие демпфирующие свойства у материалов на основе МАХ-фаз систем Ti-Al-C и Ti-Si-C, синтезированных с использованием высоких давлений и температур.

Таблица 1. Демпфирующие характеристики материалов вставок

Материал	δ , %
Сталь 40Х	0,202±0,001
ВК8	0,296±0,017
СЧ 15	0,667±0,023
Ti-Si-C	1,457±0,027
Ti-Al-C	3,007±0,021
TiNi (литой)	2,013±0,029
TiNi (авибрит)	5,191±0,031

Высокие демпфирующие характеристики материалов на основе никелида титана и МАХ-фаз систем Ti-Al-C и Ti-Si-C по сравнению с конструкционной сталью и твердым сплавом (при удовлетворительном комплексе физико-

механических характеристик) показали целесообразность их применения в качестве демпфирующих вставок в конструкции режущего инструмента.

Методом свободных затухающих колебаний были экспериментально определены логарифмические декременты колебаний δ_p резцов с различными демпфирующими вставками. Колебания в системе возбуждали одиночным ударом стального шарика при его свободном падении. Регистрацию затухающих колебаний (рис. 3) осуществляли с помощью акселерометра, закрепленного на державке резца.

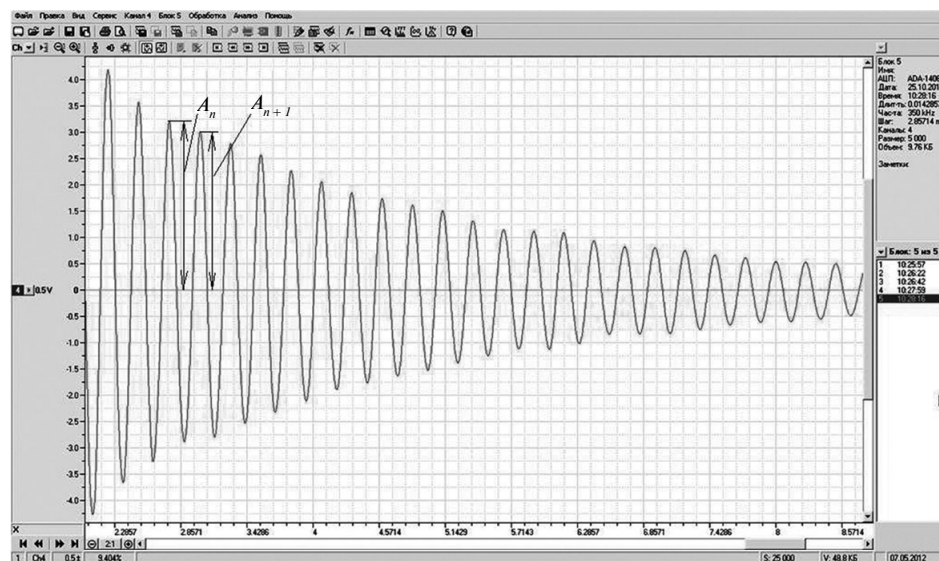


Рис. 3. Затухающие колебания державки резца после одиночного удара стального шарика.

Значение δ_p вычисляли по формуле [8]:

$$\delta_p = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}},$$

где A_n и A_{n+1} – амплитуды двух соседних колебаний.

Значения логарифмического декремента колебаний резцов с демпфирующими вставками из разных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Демпфирующие характеристики резцов с разными вставками

Материал вставок	δ_p , %
ВК8	16,59±0,23
СЧ 15	18,47±0,28
Ti-Si-C	19,11±0,19
TiNi (литой)	21,48±0,28
Ti-Al-C	25,42±0,34
TiNi (авибрит)	29,16±0,25

Из табл. 2 видно, что использование вставок из никелида титана TiNi и МАХ-фаз Ti-Al-C и Ti-Si-C позволило увеличить значение логарифмиче-

ского декремента колебаний реза δ_p в 1,2–1,8 раз по сравнению с инструментом со стандартной твердосплавной подложкой из ВК8.

Для оценки влияния демпфирующих вставок на процесс резания были измерены амплитуда виброускорений и среднеквадратические отклонения (СКО) силы резания при чистовом точении закаленных сталей. Для измерения силы резания и вибраций при точении использовали автоматизированную систему исследования процесса резания, которая была разработана в ИСМ [5].

Система состоит из токарного станка повышенной точности ТПК-125 ВМ, трехкомпонентного динамометра УДМ-100, тензостанции “Топаз”, акселерометра KD 35a фирмы “Metra Mess und Frequenztechnik”, АЦП ADA 1406 фирмы ООО “ХОЛИТ Дэйта Системс” и персонального компьютера.

Эксперименты проводили при обработке закаленной стали марки ХВГ твердостью 58–62 HRC. Геометрические параметры инструмента: $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$. Использовали режущие пластины из киборита типоразмера SNMN-060312-M. Полученные зависимости приведены на рис. 4.

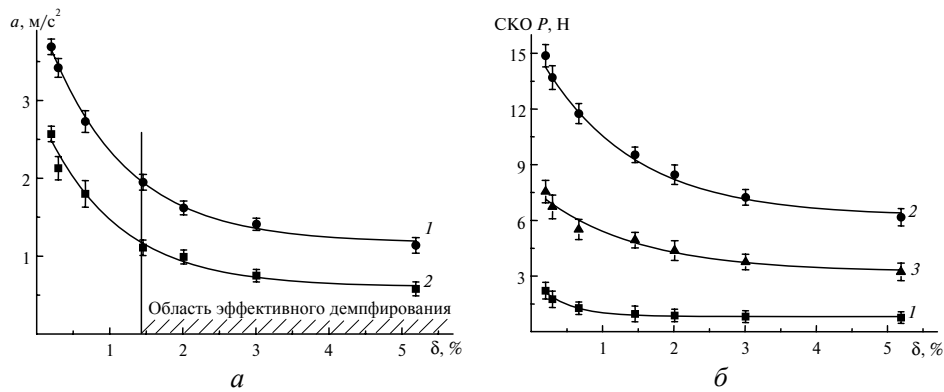


Рис. 4. Зависимости виброускорения (a) при глубине резания $t = 0,1$ (1) и $0,05$ мм (2) и СКО-составляющих P_x (1), P_y (2), P_z (3) силы резания (b) от логарифмического декремента колебаний вставок (скорость резания $v = 2,1$ м/с, подача $S = 0,08$ мм/об.).

Зависимости значений виброускорений от демпфирующих характеристик реза имели экспоненциальный характер (рис. 4, a). Увеличение логарифмического декремента затухания колебаний вставок δ от 0,2 до 1,4 приводило к уменьшению виброускорений реза в 1,9–2,1 раза. Дальнейшее увеличение δ не оказывало существенного влияния на амплитуду виброускорений. Проведенные эксперименты показали, что наиболее эффективным можно считать материал вставок с логарифмическим декрементом затухания колебаний $\delta \geq 1,4$ %.

Наибольшее влияние демпфирующие вставки оказывали на значения СКО составляющих силы резания P_y и P_z . Использование вставок привело к уменьшению СКО составляющей P_y в 2,0–2,5 раза, а составляющей P_z – в 1,4–1,7 раза.

Для изучения влияния режимов резания на уровень вибраций инструментов с разными демпфирующими вставками провели дополнительные исследования при чистовом точении закаленной стали марки У8 твердостью 60–62 HRC (рис. 5).

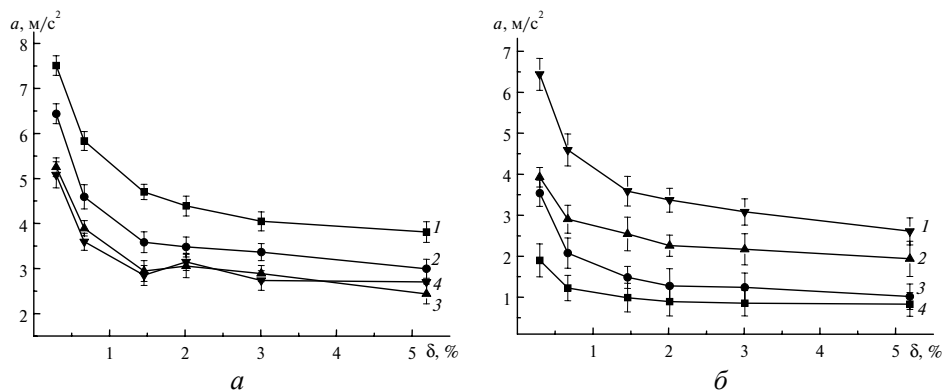


Рис. 5. Зависимости виброускорений от логарифмического декремента колебаний демпфирующих вставок для скорости резания $v = 1$ (1), 1,5 (2), 2 (3), 2,5 (4) м/с (а) и подачи $S = 0,22$ (1), 0,16 (2), 0,11 (3), 0,08 (4) мм/об. (б); глубина резания $t = 0,1$ мм.

На рис. 5 видно, что использование демпфирующих вставок с $\delta \geq 1,4\%$ позволяет уменьшить виброускорения по сравнению с твердосплавными вставками в 1,7–2,0 раза во всем диапазоне скоростей резания. При этом увеличение скорости резания от 1,0 до 2,5 м/с приводит к уменьшению вибраций. Это объясняется тем, что с увеличением скорости резания растет температура в зоне резания, что приводит к разупрочнению обрабатываемого материала и, как следствие, к уменьшению сил резания и амплитуды колебаний.

Увеличение подачи приводило к росту (в 3,0–3,5 раза) амплитуды колебаний, поскольку с повышением подачи увеличивается сила резания, а вследствие этого растет и амплитуда колебаний.

Для оценки влияния демпфирующих вставок на износостойкость режущего инструмента из КНБ при гладком непрерывном чистовом точении были проведены эксперименты со вставками из никелида титана, а также твердого сплава ВК8. Оценку износа инструмента производили по размеру площадки износа на задней поверхности h_3 (рис. 6).

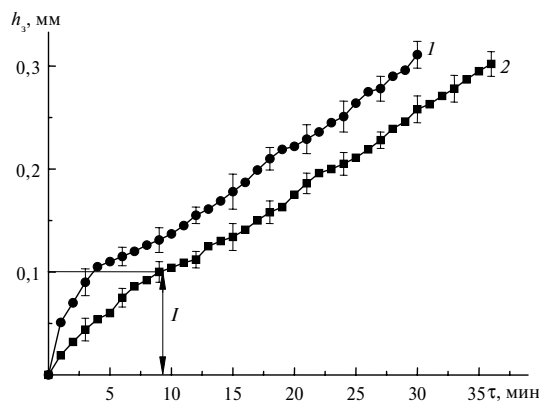


Рис. 6. Кривые износа режущего инструмента из КНБ с демпфирующими вставками из ВК8 (1) и TiNi (2) при точении стали марки ХВГ твердостью 58–62 HRC ($v = 2$ м/с, $S = 0,15$ мм/об., $t = 0,1$ мм).

Характерным при использовании демпфирующих вставок из TiNi является значительное уменьшение интенсивности износа на начальном (до $h_3 = 0,1$ мм) этапе, что связано с уменьшением амплитуды виброускорений по

сравнению со стандартными резцами (рис. 7). При этом стойкость резца увеличилась в 1,2–1,3 раза. Снижение интенсивности износа острого (неизношенного) резца объясняется тем, что на его режущей кромке возникают большие напряжения, близкие к пределу прочности КНБ. В связи с этим на режущей кромке инструмента под действием сильных колебаний происходят микровыкрашивания зерен КНБ, что приводит к интенсивному механическому износу на этапе приработки резца (см. рис. 6, участок *I*).

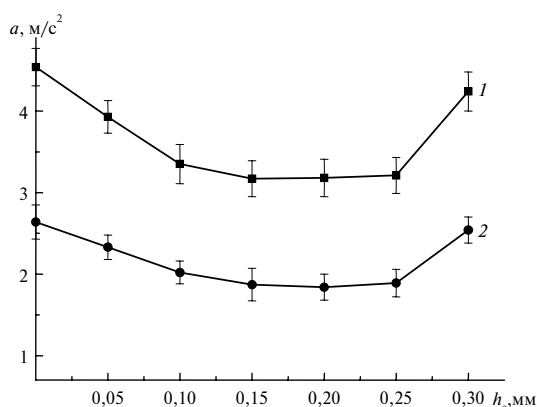


Рис. 7. Влияние износа инструмента из КНБ с демпфирующими вставками из VK8 (1) и TiNi (2) по задней грани h_3 на виброускорение при точении стали марки ХВГ твердостью 58–62 HRC ($v = 2$ м/с, $S = 0,15$ мм/об., $t = 0,1$ мм).

Были проведены исследования влияния демпфирования резца вставками из различных материалов на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности (рис. 8). Демпфирование резца позволило получить шероховатость Ra обработанной поверхности на 35–45 % меньше по сравнению со стандартным инструментом. Это связано с уменьшением амплитуды колебаний при точении (см. рис. 7). В период приработки (до $h_3 = 0,1$ мм) увеличение износа инструмента по задней поверхности приводило к уменьшению амплитуды колебаний. При $h_3 = 0,1-0,25$ мм (период нормального износа) амплитуда вибраций и, соответственно, шероховатость обработанной поверхности были минимальными. При дальнейшем увеличении износа ($h_3 > 0,25$ мм) возрастала амплитуда вибраций и, как следствие, увеличивалась шероховатость поверхности.

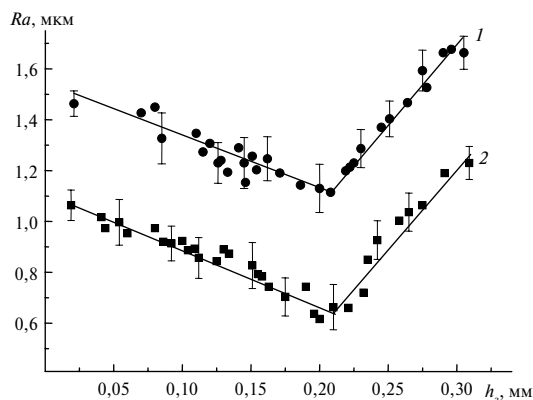


Рис. 8. Влияние демпфирования резца вставками из VK8 (1) и TiNi (2) на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности при точении стали марки ХВГ 58–62 HRC при разной величине износа h_3 ($v = 2$ м/с, $S = 0,15$ мм/об., $t = 0,1$ мм).

Анализ зависимостей на рис. 7 показал, что амплитуда колебаний зависит от величины износа h_3 . Можно выделить три зоны на кривых износа: первая – до износа $h_3 = 0,10\text{--}0,15$ мм, где происходит уменьшение амплитуды колебаний, вторая – при $h_3 = 0,15\text{--}0,25$ мм, уровень колебаний мало изменяется, и третья – после $h_3 \geq 0,25$ мм, амплитуда колебаний начинает стремительно возрастать.

Такая зависимость объясняется действием двух факторов. С одной стороны, ленточка износа с задним углом $\alpha = 0$ противостоит углублению инструмента в поверхность резания при вибрациях и увеличивает демпфирование. С другой стороны, увеличение износа приводит к увеличению сил резания и трения и, как следствие, к увеличению амплитуды колебаний. Действие этих двух факторов четко прослеживается на рис. 8. Так, до значений износа $h_3 \approx 0,22$ мм шероховатость уменьшается в связи с положительным влиянием ленточки износа на амплитуду колебаний. После этого значения влияние сил резания начинает преобладать, что приводит к росту вибраций и шероховатости обработанной поверхности.

Также проведены исследования влияния демпфирования на износостойкость режущего инструмента из КНБ при непрерывном чистовом точении закаленных сталей марок 35ХГСА, ХВГ и У8 твердостью 45–52, 58–62 и 64–67 HRC соответственно. На рис. 9 представлены кривые износа режущего инструмента из КНБ при точении стали марок 35ХГСА и ХВГ.

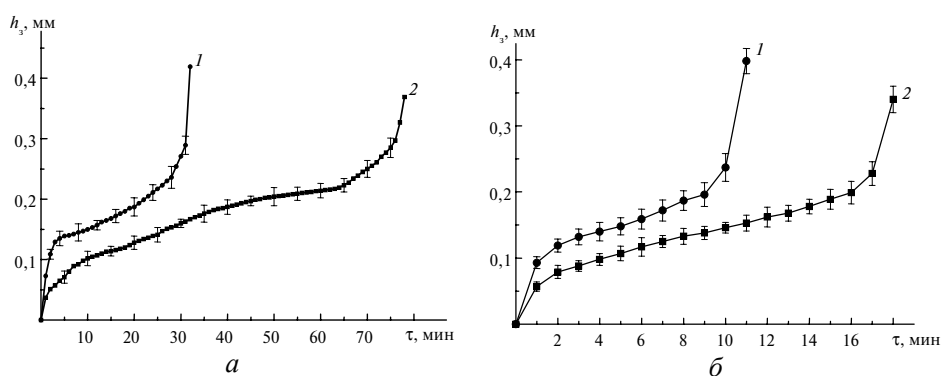


Рис. 9. Кривые износа режущего инструмента из КНБ с демпфирующими вставками из ВК8 (1) и TiNi (2) при точении с ударом стали марок 35ХГСА (а) и ХВГ (б) ($v = 1,2$ м/с, $S = 0,15$ мм/об., $t = 0,1$ мм).

Использование демпфирующих вставок из TiNi позволило повысить стойкость режущего инструмента из КНБ. При этом его стойкость при обработке стали марки 35ХГСА увеличилась в 2,4 раза, стали марки ХВГ – в 1,6 раза, У8 – в 1,5 раза по сравнению со стандартным инструментом. Меньшее влияние демпфирующих вставок на стойкость режущего инструмента из КНБ при точении сталей марок ХВГ и У8 по сравнению с 35ХГСА объясняется тем, что они имели большую твердость и, как следствие, в процессе их обработки температура в зоне резания была выше. Увеличение температуры в зоне резания приводило к нагреву демпфирующих вставок и к уменьшению демпфирующих характеристик вставок из никелида титана, который, как известно, при температурах > 100 °С частично теряет демпфирующие свойства [9]. Поэтому при точении закаленных сталей с твердостью > 60 HRC необходимо использовать демпфирующие вставки из МАХ-фаз, которые имеют большую

термостойкость, чем никелид титана и не теряют демпфирующих свойств с ростом температуры.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований разработана конструкция инструмента со специальными вставками из демпфирующих материалов, имеющего повышенную способность гашения колебаний.

При увеличении логарифмического декремента колебаний демпфирующих вставок от 0,2 до 1,4 % значения виброускорений уменьшаются в 1,9–2,1 раза. Полученные зависимости позволили определить оптимальные демпфирующие характеристики вставок (декремент затухания $\delta > 1,4$ %).

Демпфирующие вставки позволили уменьшить среднеквадратические отклонения составляющей силы резания P_y в 2,0–2,5 раза, а составляющей P_z – в 1,4–1,7 раза. Использование элементов из высокодемпфирующих материалов уменьшает амплитуду виброускорений по сравнению со стандартным инструментом в 1,7–2,0 раза. С повышением скорости резания от 1,0 до 2,5 м/с значения виброускорений уменьшаются в связи с ростом температуры в зоне резания и разупрочнением обрабатываемого материала, что приводит к уменьшению силы резания. Увеличение подачи вызывает увеличение силы резания и, как следствие, возрастает амплитуда колебаний.

Применение демпфирующих вставок из TiNi позволяет избежать интенсивного износа до величины износа по задней грани $h_3 = 0,1$ мм вследствие уменьшения амплитуды колебаний: стойкость резца при непрерывном чистовом точении закаленных сталей увеличилась в 1,2–1,3 раза, а при прерывистом точении закаленных сталей марок 35ХГСА – в 2,4 раза, ХВГ – в 1,6 раза, У8 – в 1,5 раза по сравнению со стандартным инструментом.

Демпфирующие вставки из TiNi уменьшают шероховатость обработанной поверхности (Ra на 35–45 % ниже по сравнению с обработкой стандартным инструментом), минимальная шероховатость обработанной поверхности достигается при значениях износа $h_3 = 0,1–0,25$ мм, при которых амплитуда колебаний минимальна.

При обработке закаленных сталей с высокой (более 60 HRC) твердостью и при скоростях резания больше 2 м/с целесообразно использовать в качестве демпфирующих элементов вставки из МАХ-фаз, которые не теряют демпфирующих свойств с ростом температуры.

Розроблено конструкцію інструменту зі спеціальними вставками з демпфуючих матеріалів, що має підвищену здатність гасіння коливань. Досліджено вплив демпфуючих властивостей на амплітуду коливань, стійкість різців з КНБ і шорсткість обробленої поверхні.

Ключові слова: коливання, демпфуючі властивості, кубічний нітрид бору, логарифмічний декремент коливань, знос, віброприскорення, чистове точіння, загартована сталь.

A new tool design has been elaborated which includes special elements made of damping materials thus providing the tool with an increased vibration-damping ability. The paper addresses the influence of damping properties on the vibration amplitude, cBN tool life, and machined surface roughness.

Keywords: vibration, damping properties, cubic boron nitride, logarithmic decrement of vibration, wear, vibration acceleration, fine turning, hardened steel.

1. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании: Серия “Библиотека инструментальщика”. – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с.

2. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахитадт А. Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.
3. Пат. 57353 Україна, В23В27/16. Різальний інструмент / Л. М. Девін, О. А. Осадчий. – Заявл. 19.07.2010; Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.
4. Devin L. M., Bondarenko V. P., Osadchyi O. A., Nimchenko T. V. Application of acoustic methods for the monitoring of products made of hard alloys // Mater. Sci. – 2009. – **45**, N 3. – P. 392–398.
5. Девин Л. Н., Сулима А. Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания // Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД). – 2008. – № 3. – С. 24–26.
6. Шевченко А. Д., Шульженко А. А. Новый материал с высокой демпфирующей способностью // Физика и техника высоких давлений. – 1991. – **1**, № 3 – С. 26–31.
7. Старостина А. В., Прихна Т. А., Осадчий А. В. и др. Исследование демпфирующих свойств материалов на основе МАХ фазы Ti_3AlC_2 // Проблемы современного физического материаловедения. – 2011. – № 20. – С. 73–79.
8. Куліш В. В., Соловійов А. М., Кузнєцова О. Я., Кулішенко В. М. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредито-модульна система: Навч. Посібник: В 2 ч.– Київ: НАУ, 2005. – Ч. 2. – 380 с.
9. Роцупкин В. В., Ляховицкий М. М., Покрасин М. А. и др. Экспериментальное исследование акустических свойств никелида титана // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 12-го междунар. науч.-техн. семинара, 20–24 февр. 2012 г., г. Свальява. – Киев: АТМ України, 2012. – С. 230–235.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 08.05.12