

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В.Н. Пучкин¹⁾, О.А. Сумская²⁾, И.Г. Крупнова³⁾

1) к.т.н., доцент Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, puchkin52@bk.ru

2) к.т.н., доцент Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, oalexal4@gmail.ru

3) к.п.н., директор ГБПОУ КК «Армавирский машиностроительный техникум»

Аннотация: в данной статье описаны исследования флуктуационных и статических характеристик процесса трения и износа инструментальных материалов

Ключевые слова: флуктуационная характеристика, инструментальный материал, термо-ЭДС, твердый сплав, режущая керамика.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLUCTUATING STATIC CHARACTERISTICS OF CONTACT INTERACTION

V.N. Puchkin¹⁾, O.A. Sumskaya²⁾, I.G. Krupnova³⁾

1) Ph. D., associate Professor, Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Armavir, Russia, puchkin52@bk.ru

2) Ph. D., associate Professor, Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Armavir, Russia, oalexal4@gmail.ru

3) Ph. D., Director of The State Budget Professional Educational Institution of Krasnodar Region "Armavir Mechanical Engineering Technical School"

Abstract: This article describes studies of the fluctuating and static characteristics of the friction and wear process of instrumental materials

Keywords: fluctuation characteristic, tool material, thermo-emf, hard alloy, cutting ceramics.

Для экспериментального исследования флуктуационных и статических характеристик процесса трения и износа инструментальных материалов

использовали специальную установку (рис.1) на базе токарно-винторезного станка 16К62, созданную и длительное время эксплуатируемую в лаборатории Армавирского механико-технологического института на кафедре «Машиностроение» [1,2,3,4,5].

В процессе трения (резания) осуществлялся контакт контртела 1 (обрабатываемой детали) с пластиной инструментального материала 3 укрепленной в державке 2. Линейные колебания державки регистрировались тремя акселерометрами 4 датской фирмы Брюэль и Кьер типа 4329 (резонансная частота 47 кГц), которые крепились к державке шпильками таким образом, чтобы ось наибольшей чувствительности каждого из датчиков располагалась параллельно одной из осей координат, т.е. направлению действия компонент сил и скоростей резания. Сигналы от акселерометров поступали в трехканальный усилитель-интегратор 5, а затем регистрировались милливольтметрами 8, 9 и 10 переменного тока ВЗ-57 и записывались многоканальным самопишущим милливольтметром НЗ38-4

Для регистрации амплитудно-частотных спектров виброскоростей \tilde{v}_x , \tilde{v}_y и \tilde{v}_z использовали анализатор спектра 6 типа СК4-58 и графопостроитель 7 и частично магнитограф 12 типа Н0-67 с последующей обработкой полученной информацией по специальной программе на ЭВМ (блоки 13 – 15).

Перед проведением эксперимента каждый канал измерения виброскорости тарировался на специальном вибростоле, сообщавшем укрепленному на нем акселерометру калибровочный сигнал с частотой 50Гц и максимальным значением виброускорения, равного ускорению свободного падения G .

Постоянные компоненты усилия трения (резания) \bar{P}_x , \bar{P}_y и \bar{P}_z , измерялись модернизированным трехканальным динамометром 17 модели УДМ-600, в котором для повышения чувствительности были применены полупроводниковые резисторы типа КТД-2А. Сигналы с полумостовых схем динамометра подавались на трехканальный усилитель постоянного тока 18, собранный на интегральных операционных усилителях К284 УД1В и регистрировались многоканальным самописцем 19 модели НЗ38-4. Переменные составляющие усилий \bar{P}_x , \bar{P}_y и \bar{P}_z , (среднеквадратичные значения) измерялись милливольтметрами 24 – 26 переменного тока ВЗ-28А и регистрировались самописцем.

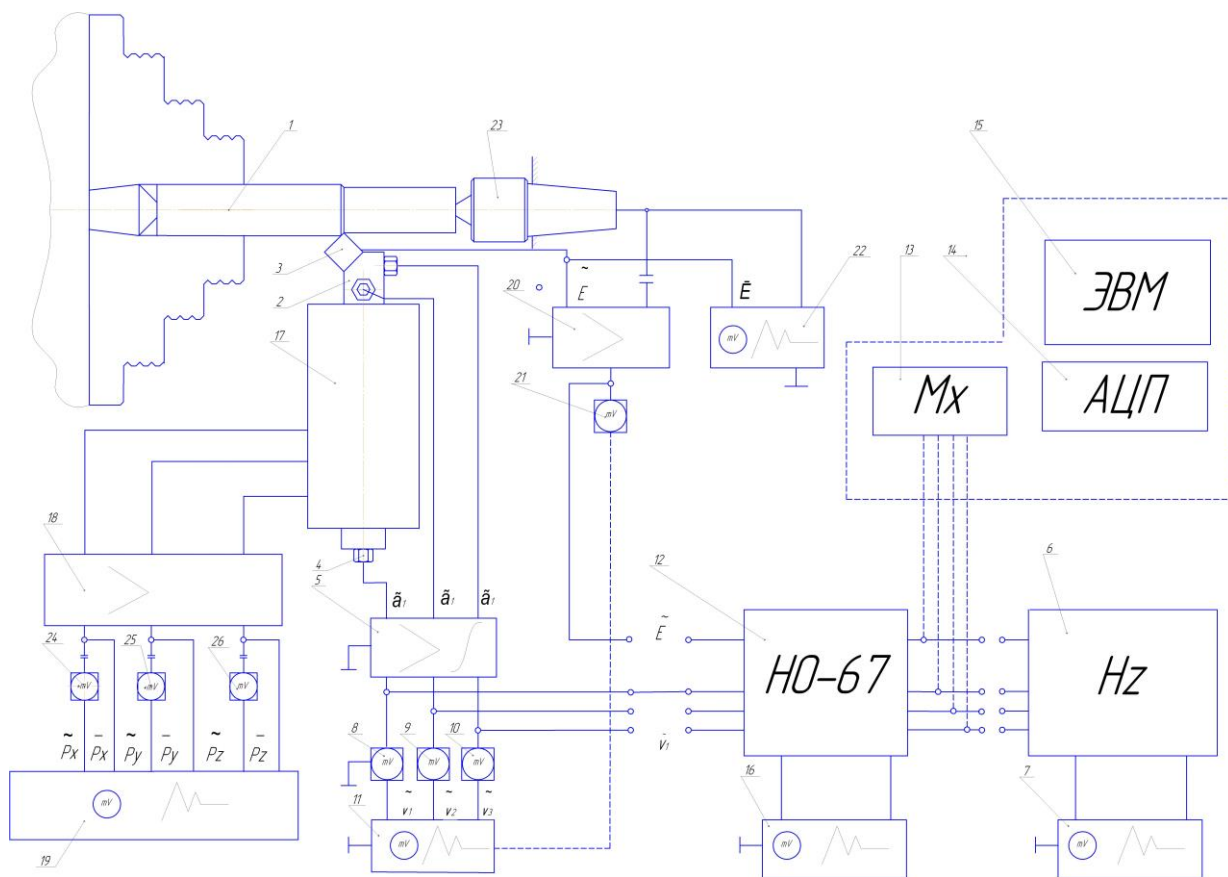


Рисунок 1 – Схема измерения статических и флуктуационных параметров зоны трения (резания) [1]

Сигнал термоЭДС снимался с элементов пары трения 1 и 3 через ртутный токосъемник 23. Постоянная составляющая термоЭДС \bar{E} регистрировалась милливольтметром 22 постоянного тока НЗ99. Переменная термоЭДС \tilde{E} подавалась на вход измерительного усилителя 20, и ее среднеквадратичное значение измерялось милливольтметром переменного тока 21 типа ВЗ-57. В некоторых экспериментах амплитудно-частотный спектр сигнала \tilde{E} регистрировался приборами 6 и 12.

Полагая, что виброскорости линейных колебаний державки с инструментальным материалом косвенно характеризуют флуктуации напряжений, а переменные составляющие термо-ЭДС – флуктуации температур в контактной зоне, изучали их амплитудно-частотные характеристики. Как показали исследования М.М. Климова, с увеличением скорости трения (резания), нагрузки, механических характеристик обрабатываемого материала и площадки контакта из-за износа растут среднеквадратические значения скоростей.

Обращает на себя внимание смещение спектров переменной термо-ЭДС \tilde{E} в зону больших частот с увеличением скорости трения и резания (как и ранее было отражено нами в [1,2,3]), а также частотная локализация флуктуационных параметров процесса изнашивания твердых сплавов, т.е. появление резонансных пиков (рис. 2 и 3).

Независимо от обрабатываемого материала и сорта твердого сплава локализация спектра (максимум амплитуды) проявляется на одинаковых частотах, причем на высоких скоростях для углеродистой стали 45 покрытие

TiN на сплаве T15K6 уменьшает амплитуду $\tilde{\varepsilon}$ (ср. кривые 3 и 4 на рис.2). Для жаропрочной стали 12X18H9T, имеющей меньшую теплопроводность, чем сталь 45, покрытие TiN, да и сплав T15K6, неоптимальные с точки зрения теплового состояния для этой стали, на высоких скоростях повышают амплитуду $\tilde{\varepsilon}$ (ср. кривые 2, 3,4 на рис. 3).

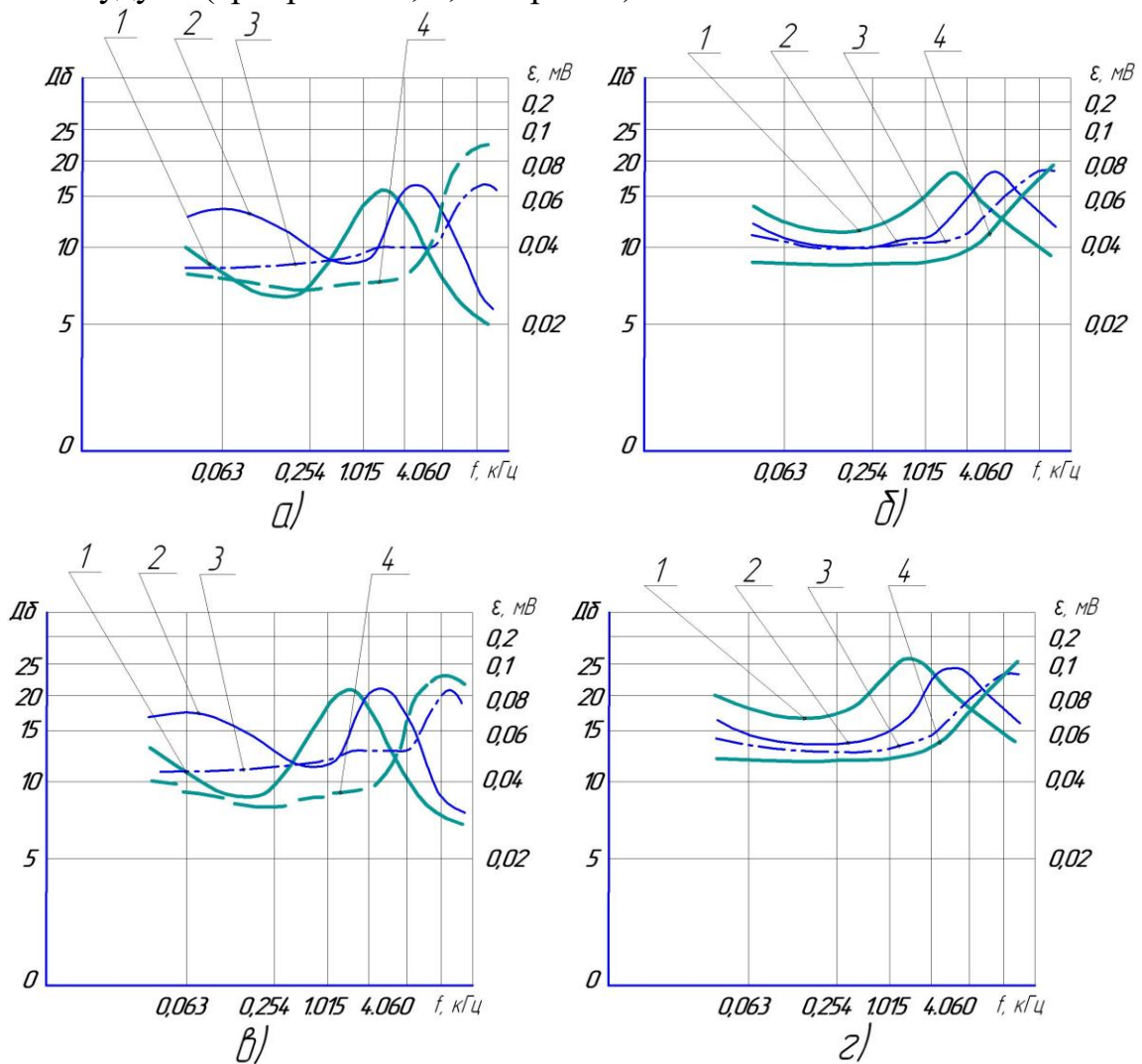


Рисунок 2 – Влияние скорости резания на спектр переменной составляющей термоЭДС при точении стали 45 [1,2,3] ($S = 0,3 \times 10^{-3}$ м/об; $t = 0,5 \times 10^{-3}$ м) твердыми сплавами T15K6 (а), T15K6+TiN (б) и резцами, оснащёнными пластинами из оксидно-карбидной режущей керамикой WOK-60 (в), и режущей керамикой на основе нитрида-кремния НКРК-50 (з): 1 – $v = 1,7$ м/с; 2 – $v = 2,7$ м/с; 3 – $v = 4,4$ м/с, 4 – $v = 5,4$ м/с

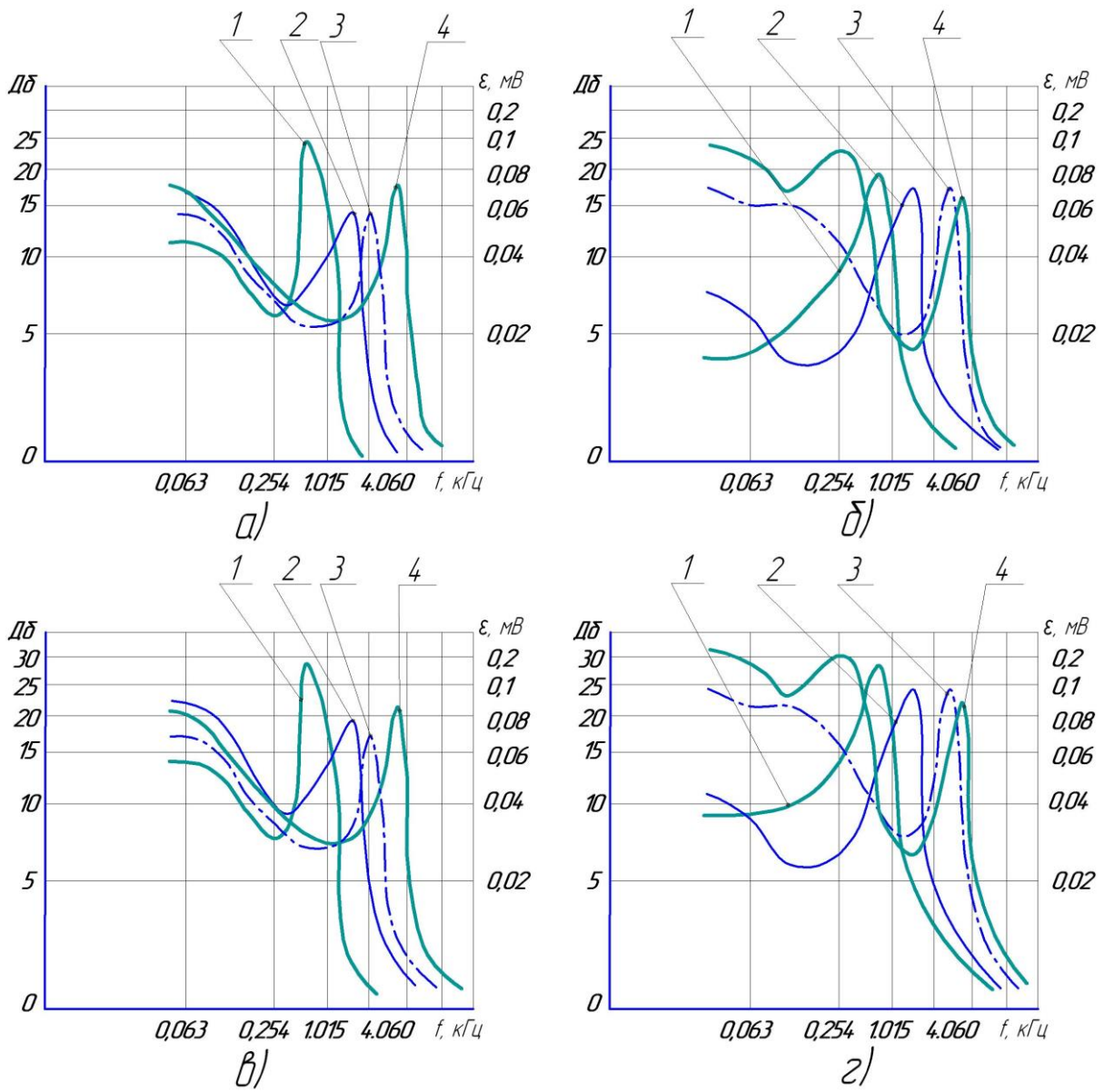
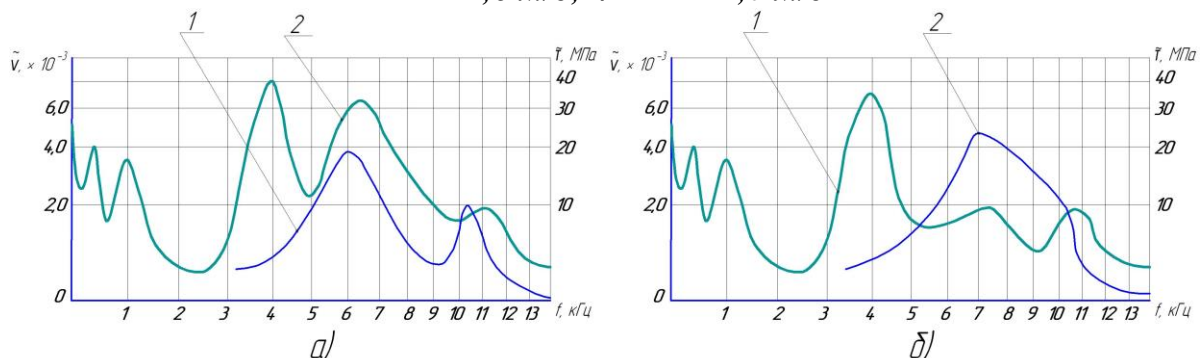


Рисунок 3 – Влияние скорости резания на спектр переменной составляющей термоЭДС при точении жаропрочной стали 12Х18Н9Т [1,2,3] ($S = 0,21 \times 10^{-3}$ м/об; $t = 0,5 \times 10^{-3}$ м) твердыми сплавами Т15К6 (а), Т15К6 + TiN (б), и резами, оснащёнными пластинами из оксидно-карбидной режущей керамикой ВОК-60 (в), и режущей керамикой на основе нитрида-кремния НКРК-50 (г): 1 – $v = 0,64$ м/с, 2 – $v = 1,0$ м/с; 3 – $v = 1,6$ м/с; 4 – $v = 2,0$ м/с



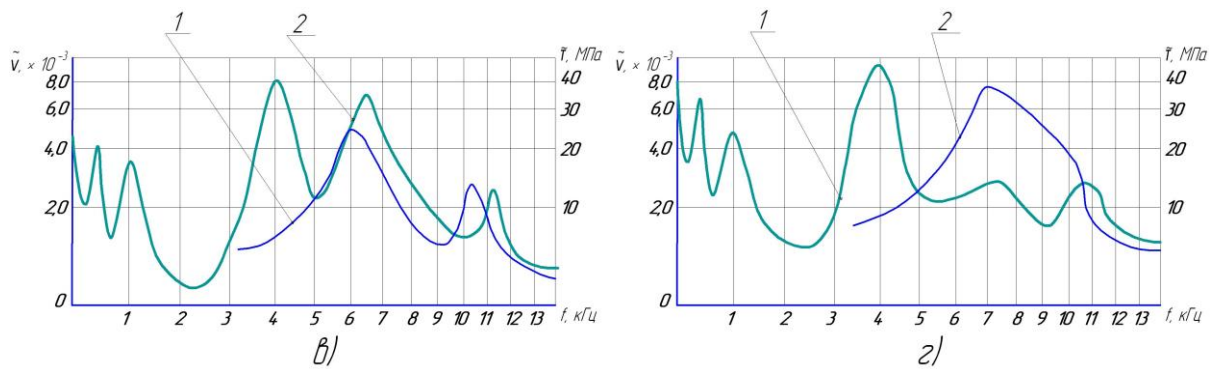


Рисунок 4 – Спектры виброскоростей и касательных напряжений при точении стали 45 твердыми сплавами T15K6 (а), T15K6+TiN (б) и резами, оснащёнными пластинами из оксидно-карбидной режущей керамикой ВОК-60 (в), и режущей керамикой на основе нитрида-кремния НКРК-50 (г): [87] ($t = 0,5 \times 10^{-3}$ м; $S = 0,3 \times 10^{-3}$ м/об; $v = 2,7$ м/с): 1 – спектр \tilde{v} ; 2 – спектр $\tilde{\tau}$

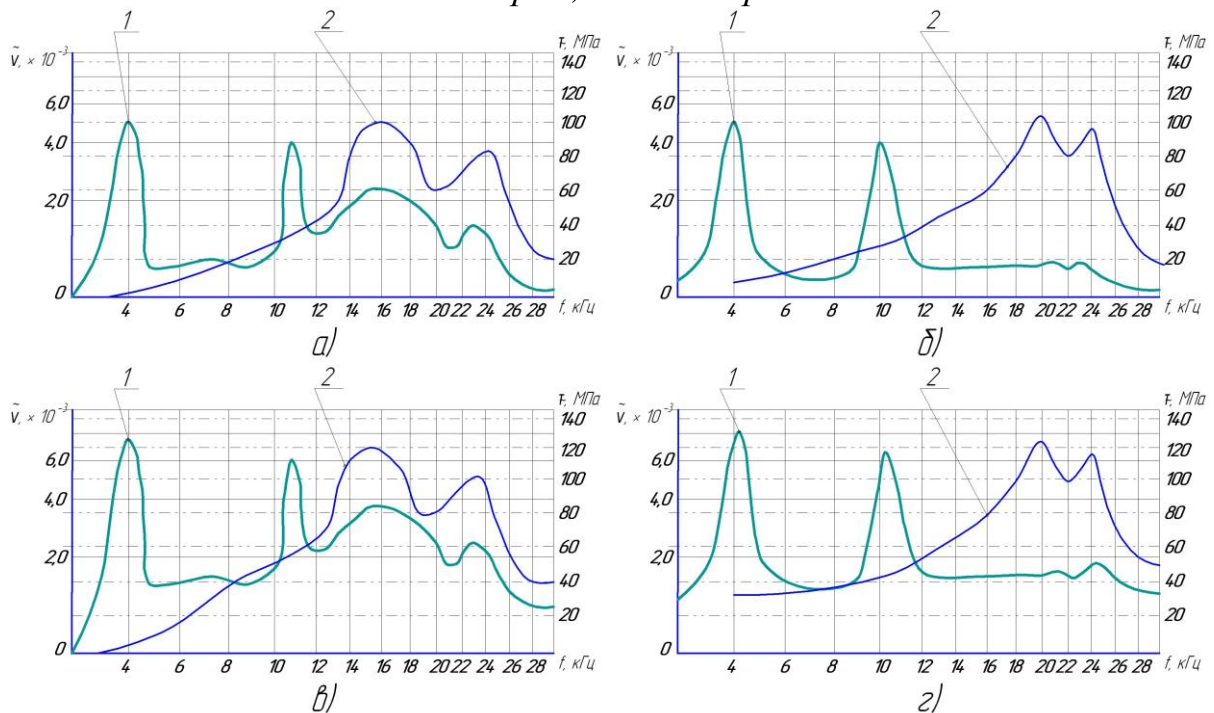


Рисунок 6 – Спектры виброскоростей и касательных напряжений при точении стали 45 твердыми сплавами T15K6 (а), T15K6+TiN (б) и резами, оснащёнными пластинами из оксидно-карбидной режущей керамикой ВОК-60 (в), и режущей керамикой на основе нитрида-кремния НКРК-50 (г) [87] ($t = 0,5 \times 10^{-3}$ м; $S = 0,3 \times 10^{-3}$ м/об; $v = 5,4$ м/с): 1 – спектр \tilde{v} ; 2 – спектр $\tilde{\tau}$

Представленные на рис. 4 и 5 в качестве примера спектры виброскоростей и касательных напряжений, полученные при точении обычным твердым сплавом T15K6 и с покрытием T15K6 + TiN, а также резами, оснащёнными пластинами из оксидно-карбидной режущей керамикой ВОК-60, и режущей керамикой на основе нитрида-кремния НКРК-50 на двух скоростях резания, свидетельствует о том, что не обнаружено статистически значимых различий в среднеквадратических

значениях виброскоростей инструмента обычного и с покрытием TiN , а также РК марок ВОК-60 и НКРК-50.

Амплитуды колебаний контактных напряжений (кривые 2 на рис.4 и 5) при обработке стали 45 сплавом Т15К6 значительно выше, чем сплавами с покрытием и режущей керамикой, и с увеличением скорости - это различие возрастает до 50%. Эти экспериментально найденные факты вместе с известными и уже рассмотренными данными о том, что покрытия не уменьшают по сравнению с твёрдым сплавом и режущей керамикой, а могут и увеличивать постоянные составляющие усилия резания, коэффициент трения, и уменьшать коэффициент усадки стружки независимо от свойств материала детали и инструмента [1,2,3], свидетельствуют косвенно о том, что физический механизм влияния покрытий связан не только с антифрикционностью покрытий. Экспериментально обнаруженное увеличение флуктуаций параметров контактного взаимодействия и локализация их частотных спектров с ростом скорости в термодинамическом аспекте можно интерпретировать как перестройку системы на качественно более высокий уровень с образованием диссипативной структуры [1, 2, 3].

Рассмотрим применимость полученных М.М. Климовым экспериментальных данных для оценки мощности источника теплоты от флуктуационных процессов. Установить закономерного влияния скорости резания на мощность тепловых флуктуаций по зависимости $\tilde{q} = \tilde{\tau} \times \tilde{v}$ не удалось, если выбирать значения $\tilde{\tau}$ и \tilde{v} на определенных частотах, например 4,6,8,10 и 12 кГц. Однако если использовать эти характеристики по максимальной амплитуде независимо от частоты, получаем зависимость (рис. б), построенную нами по данным рис.4 и 5

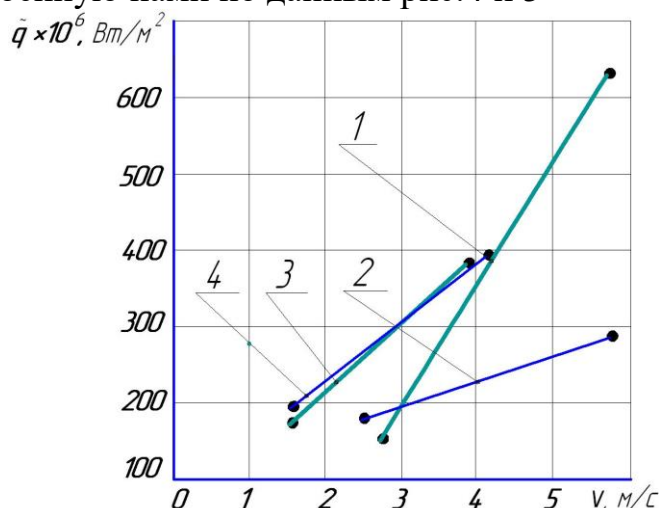


Рисунок б – Влияние скорости резания на плотность, теплового потока от флуктуаций при точении стали 45 ($t = 0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$; $S = 0,3 \times 10^{-3} \text{ м/об}$): 1 – сплав Т15К6; 2 – сплав Т15К6 + TiN; 3 – РК ВОК-60; 4 – РК НКРК-50

Увеличение величины \tilde{q} с ростом скорости резания закономерно и не противоречит физике процесса теплообразования на микроуровне.

Покрытие TiN на высоких скоростях, как видно из рис. 6, уменьшает плотность тепловых флуктуаций источника \tilde{q} в 1,8 – 2,1 раза, а на

сравнительно малых скоростях, наоборот, увеличивает \tilde{q} . У режущей керамики ВОК-60 и нитрида кремниевой РК НКРК-50 на высоких скоростях, также уменьшается плотность тепловых флуктуаций источника \tilde{q} в 1,9 – 2,1 раза, а при малых скоростях $v = 90...100$ м/мин, увеличивает \tilde{q} .

Оценим плотности теплового потока \tilde{q} в сравнении с тепловым потоком от трения по передней поверхности q_n , имея в виду, что в первом приближении

$$q_n = \frac{F_{II} \times v_c}{b \times c} = \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2} \times v_c \times \sin \varphi}{t \div c}; \quad (1)$$

где $v_c = \frac{v}{\xi}$ – скорость движения стружки;

$b = \frac{t}{\sin \varphi}$ – ширина среза;

t – глубина резания;

c – длина контакта по передней поверхности;

φ – главный угол в плане.

Таблица 1

Оценка плотности теплового потока от трения по передней поверхности твердосплавных резцов Т15К6 и Т15К6+ TiN и режущей керамики ВОК-60 и нитрида-кремниевой РК НКРК-50 при обработке стали 45 ($t = 1 \times 10^{-3}$ м; $S = 0,21 \times 10^{-3}$ м/об; $\varphi = 45^\circ$)

v м/с	P_x , Н	P_y , Н	$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$	ξ	$v_c = \frac{v}{\xi}$	$q_n = \tau_s \times v_c \times 10^6$, Вт/м ²
Т15К6						
2,7	160	420	450	2,45	1,1	710
4,4	145	345	422	2,43	1,8	1100
5,4	140	370	393	2,22	2,45	1220
Т15К6+ TiC						
2,7	160	390	420	2,21	1,22	420
4,4	140	370	393	1,97	2,27	1250
5,4	130	370	390	1,58	3,42	1870
ВОК-60						
1,6	150	290	326	2,34	0,68	157
2,7	134,7	260	292	2,28	1,18	245
4,4	85,5	200,5	218	1,78	2,47	382
НКРК-50						
1,6	150	270	309	1,92	0,83	183
2,7	140	230	269	1,85	1,46	279
4,4	110	200	228	1,75	2,51	407

Силу трения по передней поверхности $F_{II} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ в мерном приближении примем равной силе P_{xy} , действующей вдоль передней

поверхности, а длину пластической зоны из-за ее малости примем равной 1×10^{-3} мм. Экспериментальные данные по силам P_x , P_y и усадке стружки ξ , получены аспирантами автора, М.М.Климовым и М. Грондзкой [1] и позже проведенными нами исследованиями при резании стали 45 РИ, оснащённым пластинами из режущей керамики, плотность тепловых флуктуаций источника \tilde{q} от трения по передней поверхности на разных скоростях приведены на рис. 6.

Оказалось, во-первых, что несмотря на отсутствие разницы в силах P_x и P_y для инструментов из обычного сплава Т15К6 и с покрытием TiN, а также для оксидно-карбидной режущей керамики ВОК-60 и режущей керамики на основе нитрида-кремния НКРК-50 (табл. 4.9), мощность тепловыделения с покрытием оказалась меньше, чем для сплава без покрытия, только на скорости резания 2,7 м/с, а для РК ВОК-60 и РК НКРК-50, мощность тепловыделения меньше чем для сплава без покрытия и с покрытием на скоростях резания 1,6 м/с, 2,7 м/с, 4,4 м/с. При увеличении скорости плотность теплового потока от трения на передней поверхности, для сплава с покрытием TiN, увеличивается по сравнению с обычными сплавами: для $v = 4,4$ м/с – на 11,4 %, для $v = 5,4$ м/с – на 15,4%. Для режущей керамики марок ВОК-60 и НКРК-50 при увеличении скорости, плотность теплового потока от трения на передней поверхности, увеличивается в среднем по сравнению с обычным сплавом Т15К6 и с покрытием TiN, для скоростей $v = 4,4$ м/с – на 15,3 %..

Этот парадокс объясним меньшим значением усадки стружки и увеличением в этой связи скорости движения стружки для случаев обработки резанием твердыми сплавами с покрытиями и должен учитываться при оценках влияния покрытий на процесс изнашивания при резании.

Во-вторых, сравнивая плотности тепловых потоков от трения стружки по передней поверхности инструмента (q_{Π} , табл. 1) и от флуктуаций скорости и касательных напряжений (\tilde{q} , рис. 6), видим, что величина \tilde{q} от q_{Π} не превышает 0,1%.

Естественно, оказать сколько-нибудь значительное влияние на изменение тепловой обстановки в изнашиваемом твердом сплаве да и в режущей керамики такие маломощные потоки $\tilde{q} = (100 - 600)10^{-3}$ Вт/м² (по сравнению с $q_n = (94 - 1900) 10^6$ Вт/м²) не могут. В этой связи оптимистичный прогноз, сделанный нами на основании расчетов по зависимости (1) и показанный на рис.6, данными вышеприведенных оценок не подтверждается. Поэтому причину снижения поверхностных и объемных температур в изнашиваемом инструментальном материале с покрытиями не следует искать только в существенном влиянии флуктуационного источника теплоты на процесс теплообразования в контактной зоне.

Список использованных источников:

1. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. – Ростов н/д: ДГТУ, 2019. – 289 с.

2. Пучкин В.Н., Корниенко В.Г., Рыжкин А.А., Кашеева Т.В., Литвинов А.Е., Пломодьяло Р.Л., Работоспособность режущего инструмента, оснащённого пластинами из режущей керамики, применительно к автоматизированному производству (методология). Монография Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар. 2019. – 259 с.

3. Патент № 2699434 «Способ получения керамической пластины для режущего инструмента». /Пучкин В.Н., Корниенко В.Г., Рыжкин А.А., Балаев Э. Ю. Заявка 2019111563 приоритет изобретения от 16.04.2019

4. Патент № 2679264 «Способ получения керамической пластины для режущего инструмента». /Пучкин В.Н., Корниенко В.Г., Рыжкин А.А., Балаев Э. Ю. Заявка от 21.03.2018.

5. Пучкин В.Н., Корниенко В.Г., Рыжкин А.А., Литвинов А.Е., Пломодьяло Р.Л., Кашеева Т.В. Прогрессивные технологии изготовления режущего инструмента (методология). Монография Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», г. Краснодар. 2018. – 208 с.