

УДК 621.3.083

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ИЗНОСА РАЗВЕРТОК В ПРОЦЕССЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

Валькман Дмитрий Юрьевич, Викторова Ирина Николаевна

*Студенты 4 курса,  
кафедра «Технология машиностроения»,  
Ливенский филиал ФГОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»*

*Научный руководитель: Бакурова Ю.А.,  
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология  
машиностроения»*

*В работе проведено исследование значений термоЭДС, генерируемых при обработке отверстий развертками с различной степенью износа. Показано изменение значений генерируемых термоЭДС при работе режущей и калибрующей частей развертки. На основе статистического анализа выявлена корреляционная связь дисперсии термоЭДС с износом инструмента. Установлена возможность контроля износа разверток при выполнении технологической операции.*

Резание является одним из наиболее широко распространенных методов формоизменения материала заготовок. В условиях современного производства на процесс резания возложена задача функционального обеспечения обработки детали с требуемой точностью формы и размеров с заданной безотказностью работы [1].

Одной из главных причин отказов режущих инструментов является износ режущей кромки. Данная проблема наиболее актуальна для инструмента, используемого в современном автоматизированном производстве, гибких производственных системах, а также при обработке труднообрабатываемых, дорогостоящих деталей, когда остановка процесса резания по причине износа инструмента влечет получение брака.

Развертывание это процесс окончательной обработки отверстия для получения более точных размеров (5-10-го квалитетов точности) с параметром шероховатости обработанной поверхности Ra от 0,63 до 2,5 мкм. Развертки работают с малыми толщинами среза и на относительно низких скоростях резания, поэтому они изнашиваются в основном по задней поверхности и углу в месте перехода режущей части в калибрующую.

Развертка является чистовым (отделочным) инструментом, а потому за критерий ее износа принимается технологический износ. Критерием затупления чистовых разверток согласно ГОСТ 1523-81 считается выход размера обрабатываемого отверстия за пределы поля допуска, соответствующего заданному качеству точности и (или) увеличение параметра шероховатости Ra для отверстий квалитетов 6-8 выше 0,8 мкм.

Чистовая развертка начинает обработку отверстия только после того, как оно будет предварительно обработано получистовой разверткой или разверткой под доводку. Механизм износа разверток для предварительной обработки отверстия аналогичен износу чистовых разверток, т.е. в процессе ее постепенного износа происходит уменьшение диаметра инструмента и как следствие уменьшение диаметра отверстия и увеличение глубины резания под обработку чистовой разверткой. Чистовая развертка, осуществляя резание в отверстии, с глубиной резания большей по сравнению с нормированной, испытывает большие нагрузки, в результате ее износ наступает значительно быстрее. Вместе с тем вопрос оценки износа разверток под доводку и получистовых остается не решенным. Отчасти эту проблему можно решить,

измеряя действительные размеры отверстия после их обработки. Однако, как показывают исследования, при работе изношенной разверткой действительные размеры отверстия могут быть меньше и больше номинального размера развертки. Это объясняется тем, что зубья развертки изнашиваются неравномерно. Мелкая стружка и металлическая пыль, образующаяся при развертывании, попадая между стенкой отверстия и наиболее изношенным зубом, отжимают развертку на некоторую величину. Противоположный зуб начинает срезать слой большей глубины, увеличивая диаметр отверстия. При этом стружка царапает не только обрабатываемую поверхность, что приводит к увеличению шероховатости отверстия, но и повреждает рабочие участки режущих кромок инструмента, внедряясь в поверхностные слои материала инструмента.

В практике исследования износостойкости деталей наиболее часто применяют следующие методы: микрометрирование, взвешивание, снятие профилограмм, метод искусственных баз, радиоизотопные, спектральный анализ.

Микрометрирование. Проводят измерение линейных размеров деталей до и после их изнашивания. По разнице в размерах в соответствии с установленными техническими условиями определяют износ. Основной недостаток метода — необходимость разборки агрегата и сложность выполнения измерительных операций.

Взвешивание деталей до и после изнашивания. Применяют для проверки состояния поршневых колец, вкладышей, втулок. При этом определяют суммарный массовый (весовой) износ деталей.

Снятие профилограмм, дают высокую точность измерений, возможность определения шероховатости и волнистости, но, также существенными недостатками данного метода являются большая трудоемкость из-за операций разборки-сборки, сложность снятия профилограмм, невозможность исследования деталей, подверженных пластической деформации.

Метод искусственных баз, основан на определении местного износа детали по изменению линейных размеров отпечатков или лунок, вырезанных на их поверхности. В процессе изнашивания детали длина лунки сокращается, глубина ее уменьшается. Зная первоначальные размеры и размеры, полученные после испытаний, определяют износ деталей.

Радиоизотопные методы. Включают способы радиоактивных изотопов, радиоактивных индикаторов, нейтронной активизации. Преимущества метода радиоактивных изотопов: не требует разборки, отличается высокой чувствительностью и скоростью исследований. Недостатки: дорогостоящее оборудование, специальные меры защиты, сложность процесса активации.

Преимущества метода радиоактивных индикаторов: непрерывный контроль, точность наблюдений. Недостаток: дорогостоящее оборудование.

Преимущество метода нейтронной активации - простота исследования. Недостаток — сложность процесса активации и измерения.

Спектральный анализ. Применяют для определения износа сборочных единиц без их разборки. Спектральный анализ избирателен. Метод очень чувствительный. Этим методом можно обнаружить скрытые неисправности, например в двигателе, задолго до их внешнего проявления.

Использование вышеперечисленных методов при контроле износа режущего инструмента, и в частности для разверток в процессе выполнения технологической операции зачастую не представляется возможным. Это вызвано двумя причинами: во-первых, в производственных условиях невозможно останавливать процесс резания для того чтобы определить износ инструмента; во-вторых, зона резания труднодоступна для контролирующих устройств. При этом, в процессе развертывания, может произойти поломка развертки, вызванная преждевременным износом режущей части инструмента.

Известно, что в процессе изнашивания инструмента изменяется его термоэлектрическая способность. Установление связи линейного износа развертки с изменением ее термоэлектрической способностью дает возможность контроля линейного износа, режущей части инструмента, не останавливая процесс резания.

Таким образом, контролируя изменение значения термоЭДС, генерируемых в зоне резания можно дать косвенную оценку линейного износа развертки.

Среди существующих методов измерения термоЭДС, одним из самым малоинерционных является термоэлектрический метод с использованием естественных термопар. В естественной термопаре оба проводника, образующие спай, присутствуют в технологической подсистеме, участвуя в ней в качестве необходимых компонентов. Термоэлектродами естественной термопары служат металлические инструмент и обрабатываемая заготовка, которые в зоне контакта прижаты друг к другу достаточно плотно, а место их соприкосновения является спаем.

С целью исключения паразитных термопар, в данном эксперименте были использованы цельные развертки, изготовленные из быстрорежущей стали марки Р6М5. Были взяты новые, поработавшие и изношенные развертки. В качестве материала заготовок, были приняты заготовки, выполненные из стали Ст3, стали 20 и стали 45. Предварительно в сплошном материале заготовок было просверлено по 25 глухих отверстий, под последующее развертывание. Диаметры сверл для получения отверстий подбирались таким образом, чтобы глубина резания при развертывании составляла 0,1 мм.

Для экспериментальных исследований были взяты машинные развертки, так как шаг между зубьями строго постоянный, диаметром 4, 5 и 6 мм. Кроме того, в экспериментах были использованы чистовые развертки и развертки под доводку. Предварительно все развертки, используемые в эксперименте, были рассортированы на три группы в зависимости от длительности эксплуатации инструмента и степени его износа. В первую группу вошли развертки после 10 минут эксплуатации, во вторую – после 20 минут, в третью 35 минут резания. Развертывание предварительно полученных отверстий осуществлялось на всю глубину отверстия. Каждой из указанных разверток было обработано по 5 отверстий. Это объясняется тем, что основное время обработки составило в среднем 2,5 минуты и, следовательно, после обработки пяти отверстий развертка (в соответствии с указанным выше делением на группы) из первой группы переходила во вторую, а из второй в свою очередь в третью.

Развертывание осуществлялось на вертикально-сверлильном станке марки 2Н55 при следующих режимах: подача  $S=0,2$  мм/об; частота вращения шпинделя  $n=19$  с<sup>-1</sup>; скорость резания  $v=0,2$  м/с.

Была собрана установка для измерения термоЭДС, аналогичная установке, используемой при точении, с той лишь разницей, что токосъемник в данном случае был установлен на хвостовике развертки. Схема установки представлена на рисунке 1.

Заготовка была изолирована от контакта с зажимным приспособлением. Для изоляции использовался электроизоляционный картон марки ЭВ ГОСТ 2824-86 толщиной 1,0мм. Таким образом, была получена замкнутая электрическая цепь, состоящая из развертки 1, заготовки 2, регистрирующего прибора 4 (внешнее прецизионное устройство аналого-цифрового преобразования ЛА – 24 USB) и токосъемника 6. Частота дискретизации – 50 Гц.

Развертывание предварительно полученных отверстий осуществлялось на глубину 20 мм. Каждой из указанных разверток было обработано по 5 отверстий.

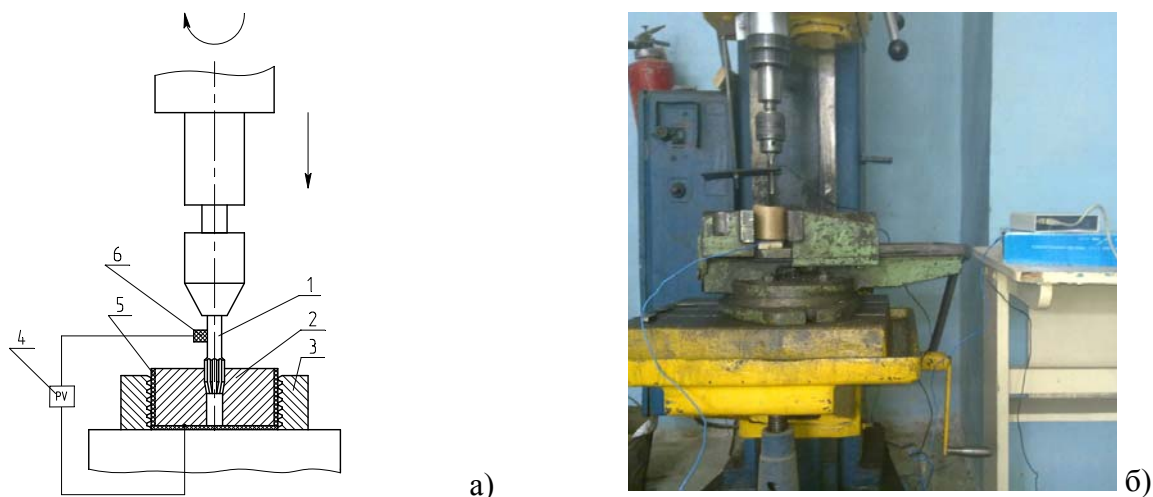


Рис. 1. Схема (а) и (б) фотография установки для измерения термоЭДС разверток:  
 1 – развертка; 2 – заготовка; 3 – зажимное приспособление;  
 4 – регистрирующий прибор; 5 – изоляционная прокладка; 6 – токосъемник

Эксперимент проводился в 3 этапа. На первом этапе исследовались значения генерируемых термоЭДС при обработке заготовок из стали Ст3 развертками с указанными выше степенями износа. На втором и третьем этапах проводили обработку отверстий в заготовках из стали 20 и стали 45соответственно.

В ходе эксперимента была выявлена следующая характерная особенность: на графиках, иллюстрирующих изменение значений термоЭДС, генерируемых в процессе развертывания, четко видны несколько областей. Первая область (рис. 2) (на рисунке эта область отделена вертикальной линией и обозначена I) это работа режущей рабочей части развертки, вторая (зона II) – начальная стадия калибровки. Третья область (зона III) – окончание калибровки. Получить данную область удалось в тот момент, когда обработка отверстия уже была завершена, автоматическая подача была отключена, но развертка продолжала вращаться, и находилась в отверстии, при этом устройство ЛА-И24USB продолжало сбор данных.

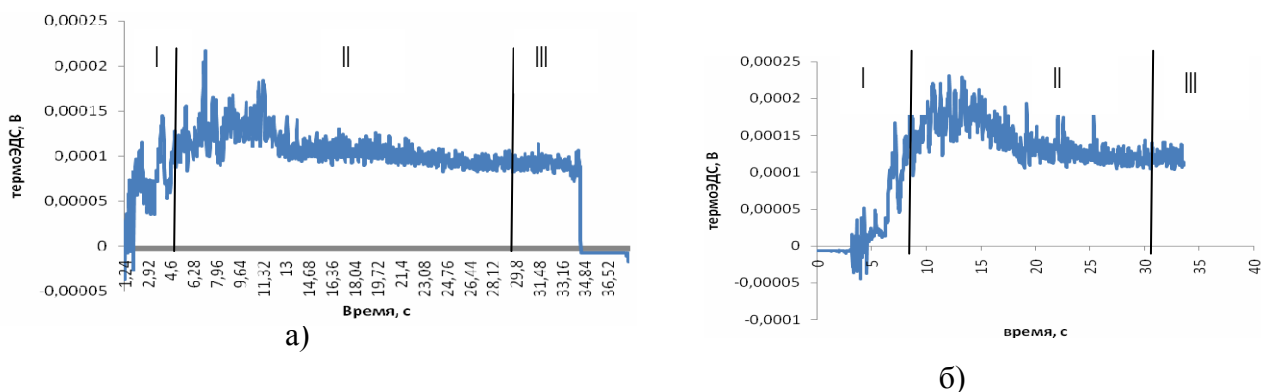


Рис. 2. ТермоЭДС, генерируемые при обработке отверстий развертками с различной степенью износа: а) новой разверткой; б) изношенной разверткой

Первая область характеризуется достаточно большим ростом значений термоЭДС, генерируемых при развертывании отверстия, когда работает только режущая часть развертки. Вторая область характеризуется некоторым увеличением значений термоЭДС и достаточно большим размахом колебаний в тот период, когда калибрующая часть развертки постепенно входит вглубь обрабатываемого отверстия и постепенной его стабилизацией с включением в работу всей длины калибрующей части развертки. Такая картина с небольшими отклонениями характерна для работы всех исследованных разверток. В связи с обнаруженным фактом было принято решение для

полученных осциллограмм провести анализ отдельно для врезания режущей части развертки и работы ее калибрующей части. Для более точного разграничения указанных областей было рассчитано время работы только режущей части, исходя из частоты вращения шпинделя, подачи, частоты дискретизации и длины режущей части развертки. Время работы режущей части разверток составило 3,5 секунды, калибрующей – 3 секунды.

Затем для каждой осциллограммы были рассчитаны значения среднего арифметического, СКО, дисперсия отдельно для каждой области.

При обработке 25 отверстий в заготовке из стали Ст 3 развертками с различной степенью износа были получены следующие данные, которые после статистической обработки для удобства сравнения представлены в форме помещаемой ниже табл. 1:

Таблица 1. Точечные оценки результатов измерения термоЭДС, генерируемой развертками с различной степенью износа при обработке отверстий в заготовках из стали Ст 3

	Врезание	Калибровка
Новая развертка		
Среднее арифметическое	$1,519 \cdot 10^{-5}$	$1,180 \cdot 10^{-5}$
СКО	$0,9263 \cdot 10^{-5}$	$0,8272 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$0,8704 \cdot 10^{-10}$	$0,6993 \cdot 10^{-10}$
Изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$2,013 \cdot 10^{-5}$	$7,353 \cdot 10^{-5}$
СКО	$1,377 \cdot 10^{-5}$	$1,596 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$1,9503 \cdot 10^{-10}$	$2,576 \cdot 10^{-10}$
Сильно изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$2,829 \cdot 10^{-5}$	$7,730 \cdot 10^{-5}$
СКО	$3,199 \cdot 10^{-5}$	$2,211 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$10,53 \cdot 10^{-10}$	$8,682 \cdot 10^{-10}$

При развертывании отверстий в заготовке, выполненной из стали 20 развертками, с различной степенью износа, были получены результаты, которые после их статистической обработки представлены в табл. 2.

Таблица 2. Точечные оценки результатов измерения термоЭДС, генерируемой развертками с различной степенью износа, при обработке отверстий в заготовках из стали 20

	Врезание	Калибровка
Новая развертка		
Среднее арифметическое	$2,370 \cdot 10^{-5}$	$7,739 \cdot 10^{-5}$
СКО	$2,243 \cdot 10^{-5}$	$3,099 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$6,847 \cdot 10^{-10}$	$1,1686 \cdot 10^{-10}$
Изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$1,574 \cdot 10^{-5}$	$2,576 \cdot 10^{-5}$
СКО	$5,080 \cdot 10^{-5}$	$3,432 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$23,405 \cdot 10^{-10}$	$17,583 \cdot 10^{-10}$
Сильно изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$15,408 \cdot 10^{-5}$	$20,311 \cdot 10^{-5}$
СКО	$5,109 \cdot 10^{-5}$	$4,723 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$37,364 \cdot 10^{-10}$	$34,972 \cdot 10^{-10}$

В процессе калибровки отверстий было замечено не большое постепенное увеличение размаха колебаний термоЭДС, практически почти не характеризующее износ инструмента в этом случае, что, наверное, объясняется мягкостью материала заготовки. При переходе к стали 45 износ инструмента стал сказываться значительно и поэтому эксперименты были продолжены с анализом результатов через каждые 2-3 калибровки отверстий.

В табл. 3 представлены результаты, полученные при обработке отверстий в заготовке из стали 45 развертками, указанных ниже диаметров с различной степенью износа.

Таблица 3. Точечные оценки результатов измерения термоЭДС, генерируемой развертками с различной степенью износа, при обработке отверстий в заготовках из стали 45

	Врезание	Калибровка
Новая развертка		
Среднее арифметическое	$8,852 \cdot 10^{-5}$	$12,042 \cdot 10^{-5}$
СКО	$4,300 \cdot 10^{-5}$	$2,194 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$20,75 \cdot 10^{-10}$	$4,983 \cdot 10^{-10}$
Изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$2,458 \cdot 10^{-5}$
СКО	$5,687 \cdot 10^{-5}$	$3,434 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$33,563 \cdot 10^{-10}$	$15,71 \cdot 10^{-10}$
Сильно изношенная развертка		
Среднее арифметическое	$12,625 \cdot 10^{-5}$	$35,439 \cdot 10^{-5}$
СКО	$6,553 \cdot 10^{-5}$	$20,092 \cdot 10^{-5}$
Дисперсия	$63,81 \cdot 10^{-10}$	$46,28 \cdot 10^{-10}$

Первая серия измерений: были развернуты 7 отверстий, подготовленных к обработке путем сверления одним и тем же сверлом. Полученные осциллограммы термоЭДС показывают, что в процессе врезания термоЭДС значительно меньше, чем в процессе калибровки и по мере перехода процесса врезания в калибровку она возрастает. Это можно объяснить тем, что в процессе врезания снимается более толстая стружка, чем в процессе калибровки, уносящее значительное количество тепловой энергии. ТермоЭДС по мере уменьшения толщины снимаемого слоя возрастает.

Кроме того, за счет выделяемой при резании тепловой энергии происходит нагрев инструмента и это так же вызывает увеличение термоЭДС.

В процессе калибровки происходил постепенный износ режущих кромок развертки, что должно было приводить к увеличению дефектов на поверхности режущей кромки и, следовательно, к увеличению дисперсии измеряемой термоЭДС.

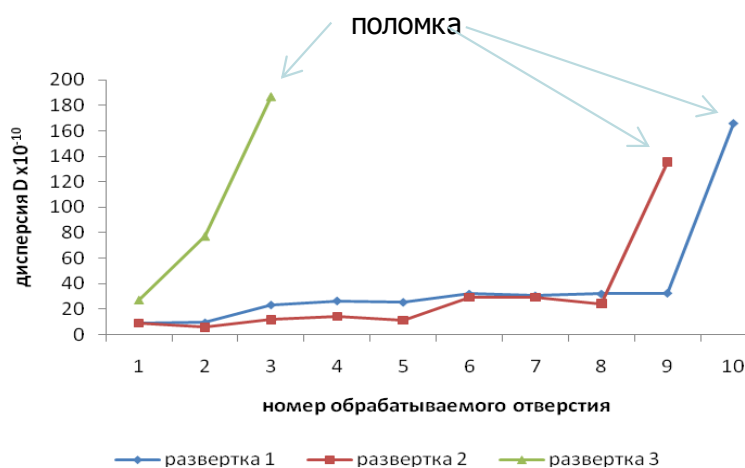
Для первых трех отверстий размах дисперсии составлял 0,005 мВ; 0,008 мВ и 0,002 мВ, т.е. в среднем 0,005 мВ. Для следующих двух отверстий эта величина составила 0,006 и 0,008 мВ (среднее 0,007 мВ) и для последних двух образцов – 0,006 и 0,012 мВ, а среднее 0,009 мВ. Таким образом, связь между размахом колебаний термоЭДС и износом развертки для этого случая установлена и, взяв две крайние выборки получаем, что увеличению среднего размаха на 0,004 мВ, т.е. на 80% от первоначального размаха соответствуют геометрический износ инструмента полученный по результатам измерения диаметра развертки до и после проведенных серий калибровок – 0,01 мм.

Опыты повторены на заготовках 2 и 3 подготовленных аналогично заготовке 1. Исследования показали, что последующее использование той же развертки для заготовки 2 дало средний размах термоЭДС 0,009 мВ. При проведении третьей серии

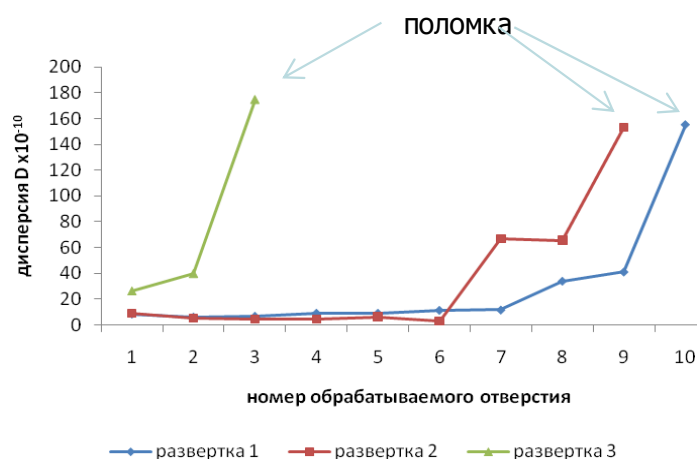
измерений (заготовка 3) в записи термоЭДС стали появляться резкие выбросы термоЭДС, показывающие наличие местных достаточно крупных микродефектов. Наличие таких выбросов фактически привело к увеличению размаха колебаний термоЭДС в 0,015 мВ, что, очевидно, соответствует недопустимости дальнейшей эксплуатации развертки.

В процессе развертывания отверстия некоторые развертки сломались, что повлекло за собой получение неисправимого брака, так как, сломавшись, развертка остается внутри обрабатываемого отверстия. Извлечь развертку из отверстия достаточно сложно, так как ее нужно высверлить, что в свою очередь приведет к увеличению диаметра отверстия, а это нарушение требований конструкторской документации. Кроме того, твердость инструментального материала развертки соответствует твердости материала сверла. Наибольшее количество отказов инструмента, связанного с его поломкой, наблюдалось при обработке отверстий в заготовках из стали 45.

По полученным экспериментальным данным были построены графики (рис.3) изменения дисперсии значений термоЭДС, генерируемых при последовательном развертывании нескольких отверстий в заготовках из стали 45, в результате чего наступил отказ инструмента (поломка развертки), отдельно для режущей (а) и для режущей и калибрующей (б) частей развертки.



а)



б)

Рис. 3. Графики изменения дисперсии значений термоЭДС, генерируемых при последовательном развертывании нескольких отверстий в заготовках из стали 45, в результате чего произошла поломка инструмента: (а) для режущей и (б) для режущей и калибрующей частей развертки

Анализируя данные, представленные на рисунке, обнаружено резкое увеличение значений дисперсии термоЭДС, в момент, предшествующий поломке развертки. Причем данный эффект обнаружен как для работы режущей части развертки, так и при совместной работе режущей и калибрующей частей развертки. При работе только калибрующей части развертки данного эффекта не обнаружено.

Проведенные ранее измерения изменения диаметров разверток и их сопоставление с полученными значениями дисперсии позволили построить зависимость изменения дисперсии термоЭДС от линейного износа калибрующей части развертки. На рисунке 4 приведен пример полученной зависимости.

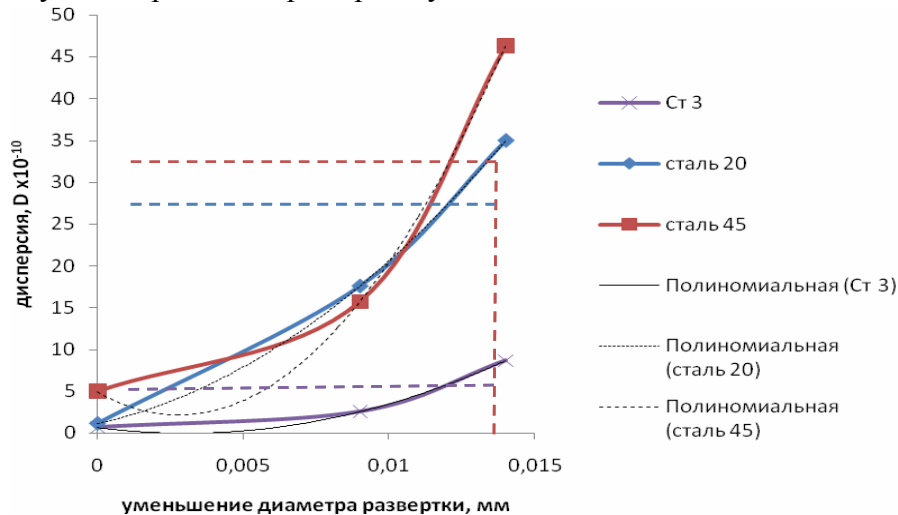


Рис. 4. Зависимость изменения дисперсии термоЭДС от линейного износа калибрующей части развертки

Характер расположения точек на графике показывает определенную закономерность: с увеличением линейного износа кромок калибрующей части развертки увеличивается дисперсия термоЭДС.

Построенную эмпирическую линию регрессии можно аппроксимировать квадратической функцией, т.е. параболой второго порядка:

$$\bar{y}_x = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$$

Пользуясь методом наименьших квадратов, получаем систему линейных уравнений относительно неизвестных параметров ( $b_0$ ,  $b_1$ , и  $b_2$ ):

$$\left. \begin{aligned} \sum y &= nb_0 + b_1 \sum x + b_2 \sum x^2 \\ \sum xy &= b_0 \sum x + b_1 \sum x^2 + b_2 \sum x^3 \\ \sum x^2 y &= b_0 \sum x^2 + b_1 \sum x^3 + b_2 \sum x^4 \end{aligned} \right\}$$

Используя результаты экспериментальных исследований, выполненных ранее, получаем следующие уравнения регрессии:

- сталь Ст 3

$$\bar{y}_x = 3,64 \cdot 10^{-10} - 1,815 \cdot 10^{-6} x + 0,00026 x^2;$$

- сталь 20

$$\bar{y}_x = 7,943 \cdot 10^{-10} - 3,324 \cdot 10^{-6} x + 0,00022 x^2;$$

- сталь 45

$$\bar{y}_x = 1,742 \cdot 10^{-10} - 6,048 \cdot 10^{-7} x + 7,058 \cdot 10^{-5} x^2.$$

Полученные графики позволяют определить конец периода врезания и начало калибровки, а так же, с учетом предварительных исследований, размерный износ калибрующей части развертки по величине переменной составляющей термоЭДС (дисперсии).

На основании изложенного можно сформулировать порядок процедуры контроля износа режущего инструмента и прогнозирования его работоспособности в процессе выполнения технологической операции. Рассмотренный метод контроля не требует существенного конструктивного изменения технологического оборудования. Для выполнения контроля инструмента в процессе его эксплуатации необходимо предусмотреть в устройстве крепления обрабатываемых заготовок или режущего инструмента изоляционную прокладку, исключающую их контакт с технологическим оборудованием, и электрическую цепь, контактирующую с изолированным инструментом или деталью с одной стороны, и контактирующее устройство с другим элементом из этой пары, с другой стороны. В эту цепь включается измерительное устройство.

Перед внедрением в производство указанного метода контроля необходимо экспериментально определить зависимость среднего значения и дисперсии термоЭДС, возникающей при обработке деталей от износа инструмента и значение термоЭДС и дисперсии, предшествующих отказу инструмента, вызванному достижением им критического значения оптимального или технологического износа. На основании полученных данных устанавливается критерий значений указанных величин, при достижении которых, необходимо прекращать технологический процесс и заменять инструмент.

В качестве измерительного устройства может быть использовано любое электронное устройство, показывающее среднее значение термоЭДС и ее дисперсию. Постоянная времени этого устройства должна быть меньше промежутка времени, необходимого для прекращения технологического процесса перед отказом инструмента.

Следует отметить, что при применении изложенного метода возможно использование инструмента только одного и того же производителя и из одной и той же партии, т.к. при переходе от одной партии к другой, критерии износа могут измениться из-за изменения технологического процесса производства инструмента.

### Литература

1. *Старков, В.К.* Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / *В.К.Старков.* – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
2. *Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.г. Мухина.* – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 648 с.: ил.
3. *Фельдштейн, Е.Э.* Обработка отверстий. Справочник сверловщика / *Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич.* – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 272 с., ил.