

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА СТЕРЖНЕВОГО ТИПА ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Алимов В. И., Афанасьева М. В. (каф. ФМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

При эксплуатации быстрорежущий инструмент испытывает циклические, динамические, тепловые нагрузки, высокие контактные нагрузки и давление на рабочую кромку, повышенные напряжения сжатия и кручения. Рабочая кромка может разогреваться до 550-650 °С. Отсюда можно сформулировать основные требования к свойствам сталей: высокая твердость и прочность, достаточная вязкость и красностойкость [1].

На машиностроительных заводах применяется достаточно большой ассортимент инструмента. Проблема износа и поломок дорогостоящего инструмента в настоящее время актуальна.

Проанализировав причины выхода из строя инструмента, и сравнив различные быстрорежущие стали, полученные различными методами, можно предположить, какие факторы имеют наибольшее влияние на технологические свойства инструмента. Анализ проводим на примере действующего производства, ЗАО «Луганский завод коленчатых валов».

В ЗАО «Луганский завод коленчатых валов» используют различные наименования инструмента; номенклатура используемого инструмента приведена на рис. 1.

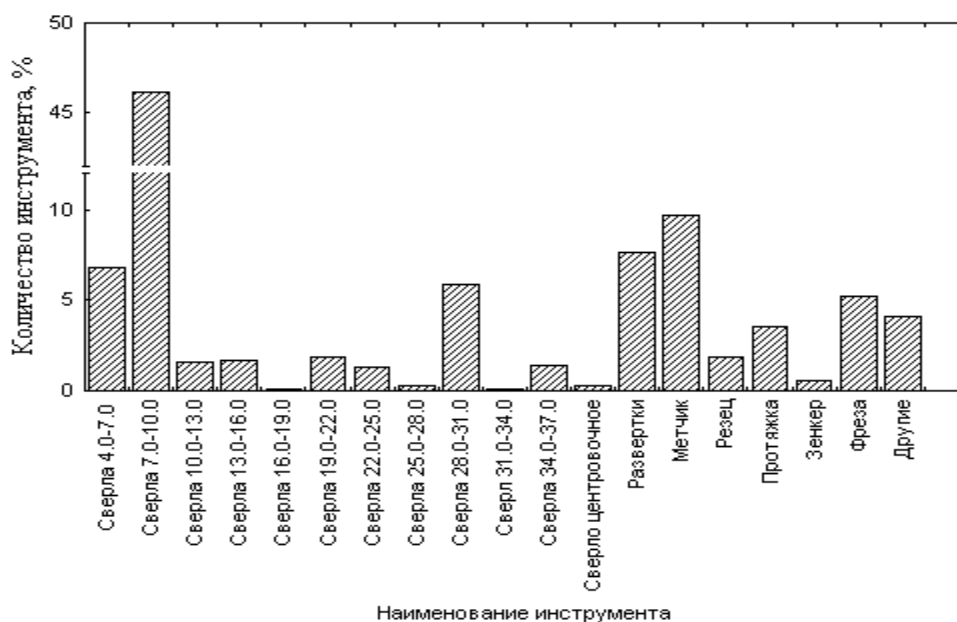


Рис. 1. Распределение инструмента в технологическом цикле ЗАО «Луганский завод коленчатых валов»

При анализе полученных данных, видно, что наиболее часто используемым инструментом являются сверла. При этом преимущественно используют сверла диаметром 7.0-10.0 мм.

В ЗАО «ЛЗКВ» используется инструмент, как заводской так и покупной.

Наиболее часто покупают и изготавливают на заводе сверла диаметром 7.0-10.0 мм, доля заводского инструмента более чем в 3 раза превышает долю покупного.

И заводские и покупные сверла выходят из строя по различным причинам. Проанализировав данные завода, можно выделить несколько причин выхода из строя инструмента (рис.2).

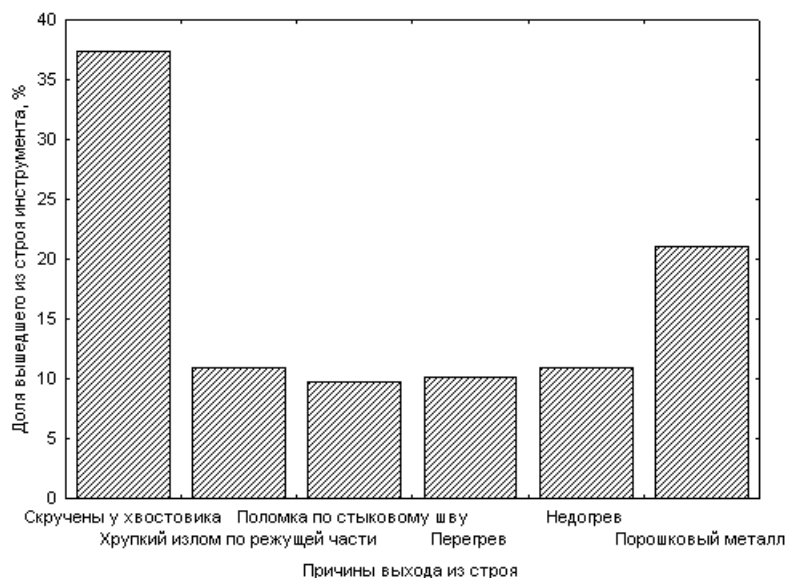


Рис. 2. Анализ причин выхода из строя инструмента

Наибольшая доля инструмента скрученного у хвостовика, далее следуют несоблюдение технологии и хрупкий излом по режущей части инструмента из порошкового металла. Однако как свидетельствуют многочисленные исследования, инструмент из порошкового металла имеет свойства близкие к инструменту, полученному методами обработки давлением [2], а, порой и превышают его [3]. Можно сказать, что инструмент изнашивается по рабочей поверхности и по причине перепада твердости по сечению.

Для экспериментального исследования были взяты три прутка разного исходного диаметра. Так как быстрорежущие стали являются трудно деформируемыми, их целесообразно подвергать экструзии. Образцы были предварительно в холодную проэкструдировали со степенью деформации: 15, 35, 50%, конечный диаметр составил 10 мм. При этом использовали стали Р6М5К5 и Р6М5К5-МП. Для сравнения способа производства, степени деформации и влияния легирования кобальтом взяли сталь Р6М5, полученную методом литья.

Исследования производились на продольных и поперечных сечениях образцов.

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ- 3 по методу восстановленного отпечатка алмазным наконечником при нагрузке 10 Н (по ГОСТ 9450-76).

На каждом образце было проведено 50 замеров. Для определения доверительного интервала, была использована программа STATISTICA. Уровень надежности $P = 95\%$, Найденные доверительные интервалы для всех измеренных значений микротвердости приведены в таблице 1.

Можно заметить, что быстрорежущая сталь Р6М5, полученная методами литья, имеет наиболее низкую твердость, по сравнению с остальными исследованными

ми сталями. Сталь Р6М5К5 в целом более мягкая, чем аналогичная сталь полученная методами порошковой металлургии. Также можно заметить, что с увеличением степени деформации твердость растёт, как для стали Р6М5К5 так и для Р6М5К5-МП.

Таблица 1. Результаты измерения микротвердости, Н/мм²

Сталь	Р6М5	Р6М5К5, экструдированная со степенью			Р6М5К5-МП, экструдированная со степенью		
		15%	35%	50%	15%	35%	50%
средняя микро-твердость	2255±43	2442±54	2948±141	3012±126	2763±108	2890±139	3030±126

Микроструктура образца из стали Р6М5 состоит из ледебуритной эвтектики и карбидов, зерно аустенита 4 номера (по ГОСТ 5639-82). Оценку величины зерна производили по методу сравнения с эталонными шкалами. Карбидная неоднородность 7-8 балла (по ГОСТ 19265-73), по шкале № 2, при увеличении 100. Микроструктура образцов из сталей Р6М5К5 и Р6М5К5-МП состоит из сорбита и карбидов. Микроструктура образцов из стали Р6М5К5 отличается более мелкодисперсной структурой, по сравнению со сталью Р6М5, так как сталь легирована кобальтом. Встречаются как мелкие округлые карбиды, так и более крупные угловатые. Карбидная неоднородность 1-3 номера. Сталь Р6М5К5-МП карбидной неоднородности не имеет, карбиды одинаковой округлой формы, равномерно распределенные по плоскости шлифа, характеризуются высокой степенью дисперсности.

По данным рентгеноструктурного анализа, в литой быстрорежущей стали Р6М5 присутствуют карбиды состава Cr_{23}C_6 . Карбидный состав сталей Р6М5К5 и Р6М5К5-МП идентичен. Он представлен такими карбидами, как: Cr_{23}C_6 и VC.

При определении размеров карбидов стали Р6М5 пользовались методом сравнения с эталонными шкалами [4]. При определении размеров карбидов в сталях Р6М5К5 и Р6М5К5-МП, пользовались линейным методом А. Розиваля, основанным на принципе Кавальери- Акера, согласно которому измерение объемов тел можно заменить измерением не только площадей, но и длин отрезков [5]. Измерение проводилось при помощи окуляр- микрометра с линейкой, разделенной на 100 равных частей на микроскопе МИМ-7.

Для уменьшения величины погрешности проводилось не менее 50 измерений в трех полях на каждом образце. Проведя анализ полученных данных можно сказать, что в целом карбиды в образцах из порошковой быстрорежущей стали мельче, чем в аналогичной, но полученной металлургическими методами. Также можно заметить, что с увеличением степени деформации, карбиды имеют более мелкий размер. Это характерно как для порошкового металла, так и для металла, полученного методами деформации.

Наследственная передача элементов структуры, сформированной деформацией, позволит повысить уровень качества инструмента стержневого типа после окончательной термообработки.

Список литературы: 1. Алімов В. І., Кримов В. М., Штихно А. П., Хребтов О. А. Про процеси деформаційно– термічної обробки швидкорізальних сталей // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні;

тематик. зб. наук. пр.- ДДМА, Краматорськ, 2002.- 567 с. 2. Мебель В. С., Титенская Г. Э., Дьяченко Н. В., и др. Использование листовой порошковой быстрорежущей стали при изготовлении инструмента типа прорезных фрез// Порошковая металлургия. 1987. № 5. с. 72-74. 3. Мухин Г. Г., Короткова Л. П. О природе высокой твердости распыленных быстрорежущих сталей// Митом. 1982. № 10. с. 8-11. 4. Панченко Е. В., Скаков Ю. А., Попов К. В. и др. Лаборатория металлографии. Под ред. Лившица Б. Г. М., 1957. 696 с. 5. Стереометрическая металлография. Салтыков С. А. Изд-во «Металлургия», 1970, 3-е изд., 376 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАГРЕВА В ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ПЛАЗМЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Алимов В.И., Колодий И.Ю. (каф. ФМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Применение высококонцентрированных источников энергии для обработки различных изделий все более вытесняет объемную термообработку в виду их известных преимуществ. К таким способам относятся обработка лазером, низкотемпературной плазмой, газовым, электрическим разрядом, гелеообработка и др.

В этой связи низкотемпературная плазма привлекает своей широтой распространения в природе относительно несложным оборудованием для ее получения и применения.

В настоящее время исследования по применению ведутся и на кафедре «Физическое материаловедение», несколько процессов запатентовано. В основном исследования ведутся по плазме получаемой при дуговом разряде и при нагреве в электролите.

Сведения по применению нагрева в электролите для обработки некоторых изделий имеются [1,2], однако в целом анализ процессов, происходящих в парогазовой оболочке малоизучен. Это процессы возникновения разряда и процессы плазмообразования [3,4]. В основном применялся высокотемпературный нагрев различных изделий под пластическую деформацию или закалку[2].

Процесс нагрева имеет несколько стадий. Каждая стадия характеризуется своими температурно-временными параметрами, охлаждение можно вести с высокой скоростью. Это условие позволяет реализовывать скоростные ступенчатые и циклические режимы термообработки на изделиях малого сечения простой формы. В этой связи каждый из этапов нагрева представляет интерес.

Для проведения опытов была сконструирована и изготовлена лабораторная экспериментальная установка для электролитно-плазменной термообработки проволоки, которая для устранения некоторых недостатков конструкции была усовершенствована. Схема технологического блока усовершенствованной установки приведена на рис. 1.

Конструкция установки основана на концевом способе нагрева в электролите, однако при применении экранирования можно реализовывать и другие способы нагрева. Конструкция установки позволяет перемещать и жестко фиксировать оба электрода в нужном положении. Также обрабатываемый электрод можно быстро как извлечь, так и погрузить в ванну, что позволяет реализовывать ступенчатые и циклические режимы.

Первоначальной задачей является снятие вольтамперной характеристики.

Исследование проводилось на цилиндрических образцах диаметрами 2,0, 4,0 и 6,5 мм, методом концевго нагрева. В качестве электролитов использовались 5, 10 и 15 % водные растворы Na_2CO_3 .

В результате исследования низковольтной области (до появления газовых разрядов), полученные вольтамперные зависимости были пересчитаны и построены графики для удельной мощности. На рис. 2 представлены графики для разных диаметров для 10% раствора Na_2CO_3 .

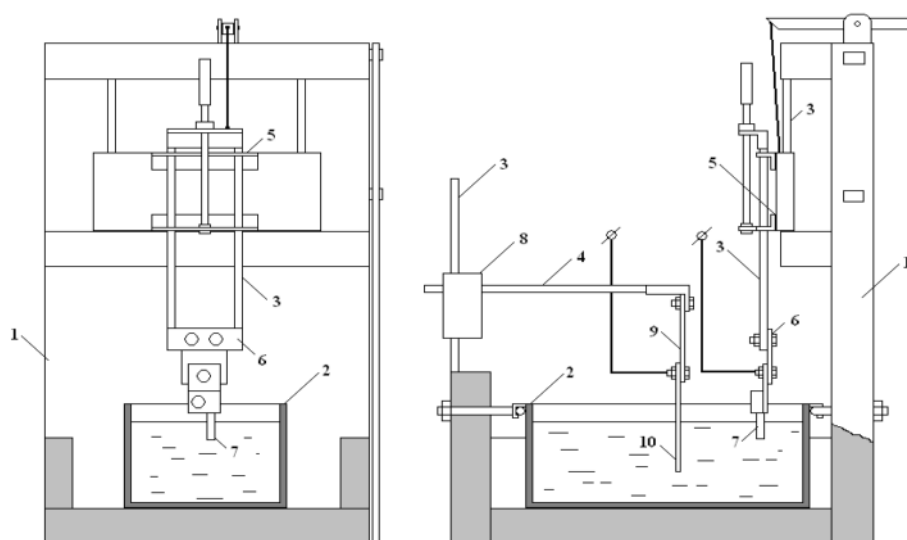


Рис. 1. Схема технологического блока:

1 – Станина; 2 – Емкость для электролита; 3 – Вертикальные направляющие; 4 – Горизонтальные направляющие; 5 – Механизм перемещения катода (при катодном процессе); 6 – Механизм крепления катода (при катодном процессе); 7 – Образец (катод); 8 – Механизм перемещения анода (при катодном процессе); 9 – Механизм крепления анода (при катодном процессе); 10 – Анод

При проведении опытов было замечено, что для образцов \varnothing 2 мм через парогазовую оболочку разряд начинал проходить начиная с 35 В, чему соответствует 330-430 Вт/см², для образцов \varnothing 4 мм – начиная с 45 В, что соответствует 330-410 Вт/см², для образцов \varnothing 6,5 мм – начиная с 55 В, что соответствует 350-410 Вт/см². Таким образом, удельная мощность, при которой начинает возникать разряд находится в пределах 330-430 Вт/см². Для растворов 5 и 15 % Na_2CO_3 удельная мощность, при которой начинает возникать разряд отличается не значительно и находится в пределах 350-450 Вт/см². С дальнейшим повышением напряжения удельная мощность продолжает расти.

Следующим этапом в исследовании низковольтной области являлось определение температурно-временных параметров. Для этого в образец \varnothing 4 мм была зачеканена термопара ТХА с диаметром спая 0,5 мм. Спай термопары находился внутри образца на расстоянии 0,5 мм от поверхности образца для уменьшения градиента температур. Этот образец был использован при исследовании низковольтной области для всех трех растворов. В результате проведенного эксперимента установлено, что до появления газовых разрядов образец разогревается лишь до температуры $\sim 100^\circ\text{C}$, что соответствует температуре кипения электролита.

Также при наблюдении за процессом было замечено, что с появлением газовых

разрядов жидкость вокруг образца начинает бурлить, что приводит к изменению уровня жидкости. И с дальнейшим повышением напряжения, а соответственно и интенсивности разрядов бурление возрастает, что приводит к трудности ведения точных измерений при применении метода концевой нагрева для образцов таких размеров, поскольку сильно возрастают колебания тока.

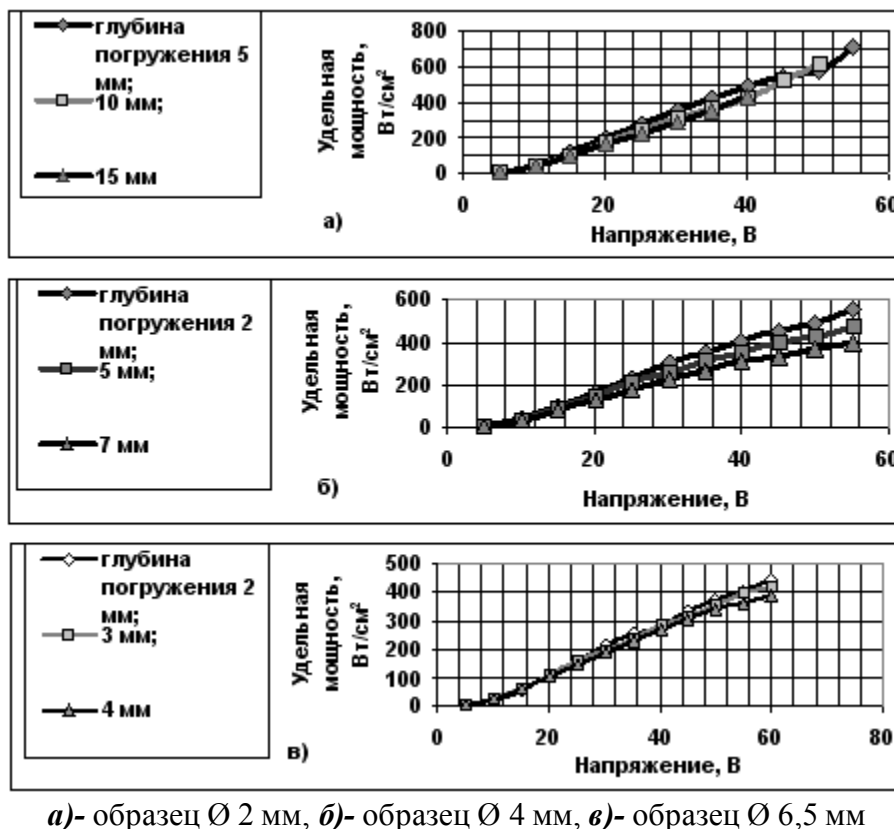


Рис. 2. Зависимость удельной мощности от напряжения на первой стадии

Таким образом, в результате исследования низковольтной области процесса электролитно-плазменного нагрева установлено, что:

- Удельная мощность возникновения газового разряда составляет 350-450 Вт/см²;
- до появления газовых разрядов образец разогревается до температуры ~100 °С, что соответствует температуре кипения электролита.

В результате установлено, что возможными вариантами применения низковольтной области электролитно-плазменного нагрева при обработке протяженных изделий из черных и цветных сплавов являются: старение, снятие внутренних напряжений, стабилизация размеров и свойств, и других режимов предусматривающих нагрев до 100°С. Но больший интерес данная стадия представляет при реализации ступенчатых и циклических режимов термообработки.

Список литературы: 1. Ясногородский И.З. Нагрев металлов и сплавов в электролите – М.: Машгиз, 1949.- 124с. 2. Ясногородский И.З. Использование в промышленности нагрева в электролите – М.: Машгиз, 1953.- 143с. 3. Дурадзи В.Н., Парсаданян А.С. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев: Штиница, 1988.- 214с. 4.

Лазаренко Б.Р. Коммутация тока на границе металл электролит Кишинев: Штиница, 1971.- 246с.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАМЫ ГОРНОПРОХОДСКОГО КОМБАЙНА 4ПП-2М

Бондарь Н.Н. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Благосостояние общества и его положение в мировом сообществе в значительной мере определяются достигнутым уровнем производительности общественного труда. Современные условия характеризуются бурным развитием производства и все более широким использованием высокопроизводительных машин во всех отраслях народного хозяйства.

Одной из основных отраслей промышленности в Украине и Донецком регионе является угольная промышленность. Для её развития и повышения добычи угля необходимо создание новой горной (шахтной) техники.

Горное машиностроение – это одна из базовых отраслей Донецкой области. Работа большинства предприятий машиностроительного комплекса Донбасса направлена на конструктивное усовершенствование и изготовление высокопроизводительной горной техники, одним из представителей которой является горнопроходческий комбайн 4ПП-2М, изготавливаемый Ясиноватским машиностроительным заводом. Качество и себестоимость изготовления горнопроходческого комбайна 4ПП-2М существенно влияет на объемы добычи и себестоимость угля. В связи с этим целью настоящей работы является снижение себестоимости обработки рамы комбайна 4ПП-2М за счет усовершенствования технологического процесса.

Рама комбайна (рис.1) 4ПП-2М, является несущим узлом. На ней располагают главную рабочую ходовую часть (гусеничный ход), редукторы, хобот с рабочей насадной головкой, пульт управления и все необходимые рабочие части по разрушению, транспортировке и загрузке угольной породы. Комбайн 4ПП-2М предназначен для механизации отбойки и погрузки горной массы при проведении горных выработок арочной, трапециевидной и прямоугольной форм сечения при работе по смешанному забою (25% угля и 75% породы с пределом прочности при одноосном сжатии 80 МПа) с углом наклона пласта $\pm 12^\circ$ в шахтах опасных по газу (метану) или угольной пыли.

В заводском технологическом процессе используется большое количество станочного оборудования, что приводит к необходимости использования больших производственных площадей. Широкое применение разметочных операций, использование рабочих высокой квалификации, завышенное количество оснастки, что не способствует экономической эффективности технологического процесса. Большое количество разметочных, обрабатывающих операций влечет за собой повышение влияния человеческого фактора на результат реализации технологического процесса. Устранить указанные недостатки можно применением многооперационных станков с ЧПУ. Применение станков с ЧПУ [1] позволит уменьшить производственные площади, повысить точность обработки основных отверстий и снизить шероховатость, уменьшить количество оснастки, снизить квалификацию рабочих.

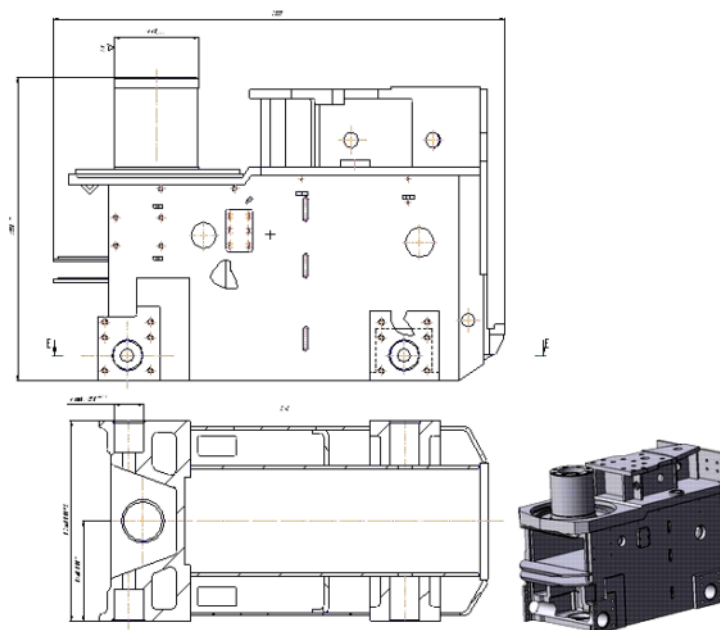


Рис. 1. Рама комбайна модели 4ПП-2М

Так как многооперационные станки представляют собой комплексные автоматические технологические системы по обработке конструктивно сложных деталей, управляемые устройствами ЧПУ на основе получаемой информации с последовательным автоматическим введением в действие различных инструментов, то для получения точных отверстий предлагаем применить многооперационный модифицированный продольный фрезерно-расточной станок модели 6М616МФ4 с комбинированной системой ЧПУ с автоматической сменой инструмента, предназначенный для комплексной обработки корпусных деталей фрезерования, сверления и растачивания. Станок имеет такие характеристики: стол шириной 1600мм, рабочая поверхность стола (L) основного исполнения 5000мм и по специальному заказу до 8000мм, рабочий ход стола $L+600$ мм, наибольшая масса допускаемой обрабатываемой детали на 1м длины стола до 6300кг, мощность электродвигателя главного привода (вращение шпинделя) 37 – 45 кВт, наибольший крутящий момент на шпинделе 5 кНм, частота вращения шпинделя $n=10\div 2000\text{мин}^{-1}$, устройство автоматической смены инструмента содержит в магазине 40÷60 штук с конусом оправок 50 и наибольшим диаметром инструмента без пропуска гнезд 125мм, а с пропуском гнезд 350 мм, наибольшая длина рабочей части оправки 500мм, наибольшая масса инструмента с оправкой 35 кг. Габаритные размеры (при длине стола основного исполнения): ширина - 7700мм, высота - 5800мм. Масса 70000кг.

В конструкцию станка входит специальная головка, позволяющая при насадке на вертикальную основную головку посредством коронки выполнять обработку боковых элементов рамы комбайна 4ПП-2М (горизонтальное расположение дополнительной головки), в том числе обеспечить применение метода деления подач для получения наиболее точных поверхностей.

Возможны несколько вариантов изготовления рамы комбайна 4ПП-2М. При наличии специальных сборочно-сварочных крепежных приспособлений можно изготовить отдельные узлы рамы и произвести сборку, что дает возможность применить станки малых габаритов для изготовления рамы. Но специальные

приспособления для выполнения сборочно-сварочных работ [2] требуют значительного времени для их изготовления, должны быть прочные и точные, иметь малые габариты, что в данном случае невозможно из-за габаритов рамы. Так как, сварочные приспособления для изготовления рамы обеспечивают малую точность, то наиболее целесообразнее применять обработку всех поверхностей после выполнения сборочно-сварочных работ. При изготовлении рамы комбайна необходимо учитывать производственную мощность завода, так как она играет немаловажную роль.

При обработке точных отверстий в теории и практике современной обработки при тонком растачивании предложен метод, названный методом деления подач [3]. Сущность метода (рис.2) заключается в установке двух чистовых резцов на одинаковый размер обработки и расположении их вершин в направлении подачи на расстоянии

$$l = (n + 0.5) \cdot S \quad (1)$$

где n - любое целое число; S – подача, мм/об.

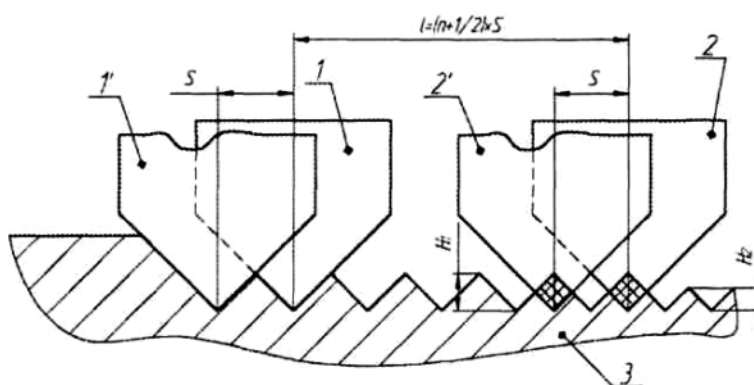


Рис. 2. Схема образования неровностей на обработанной поверхности при использовании метода деления подач

Резец 1, занимая в осевом сечении обрабатываемой детали 3 ряд последовательных положений 1, 1' и так далее, смещенных относительно один другого на величину вращательной подачи S , оставляет на обработанной поверхности неровность высотой H_1 . Смещение вершины резца 2 относительно вершины резца 1 на величину l приводит к тому, что резец 2 не копирует винтовую поверхность, образованную резцом 1, а срезает её, оставляя на обработанной поверхности неровности высотой H_2 .

При установке резцов под углом θ один к другому (в плоскости, перпендикулярной к оси борштанги) (рис.3) один резец отстает от другого в направлении вращения борштанги на угол разворота резцов 8° , которому соответствует смещение вершин резцов вдоль оси борштанги (в направлении подачи).

При усовершенствовании технологического процесса изготовления рамы горнопроходческого комбайна 4ПП-2М применен метод деления подач, предлагается выполнять все операции на многооперационный модифицированный продольный фрезерно-расточном станке с ЧПУ модели 6М616МФ4. Усовершенствование технологического процесса уменьшает производственные площади, повышает производительность, повышается точность обработки и качество поверхностей детали.

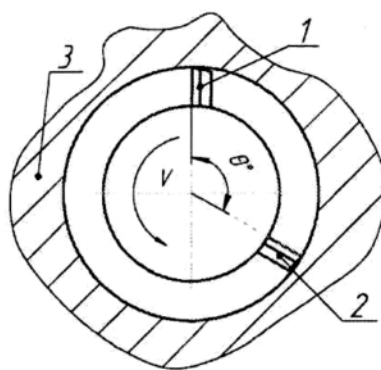


Рис. 3. Схема поворота на угол в плоскости, нормальной к оси борштанги:

1, 2 – резцы; 3 – заготовка

Список литературы: 1. Андрианов А.И. Прогрессивные методы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1975.- 240с. 2. Рыжков Н.И. Производство сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1970. –384с. 3. Якимов О.В., Гусарев В.С., Якимов О.О., П.А.Линчевский. Технология автоматизированного машинобустовання. – К.: ИСДО, 1994. - 400с.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭДС РЕЗАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Бородай К.В., Феник Л.Н., Матвиенко А.В. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Процессы трения и резания металлов сопровождаются рядом широко известных физических явлений, приводящих к износу пар трения. Среди этих явлений можно выделить возникновение электродвижущей силы между двумя контактирующими телами. Природа электрических явлений, происходящих при трении и резании, в полной мере не изучена, однако некоторые источники их возникновения были изучены достаточно давно (термо- и экзoeлектронная эмиссия, термоэлектрические эффекты). Так, именно с измерения термоЭДС начинались исследования электромеханических явлений при резании. Однако было выявлено [1], что сигнал ЭДС на измерительном приборе помимо термической составляющей включает также дополнительную разность потенциалов, которая обусловлена только относительным перемещением металлов пары в условиях интенсивного трения и больших давлений при резании. Эту составляющую ЭДС классифицируют по-разному, исходя из принятых гипотез («трибо-, деформационная ЭДС»). Отмечено также, что ЭДС и ток резания включают постоянную и переменную составляющую.

Современные исследования данного вопроса включают несколько направлений, среди них отметим использование сигнала ЭДС для управления режимами резания и его использование для контроля износа инструмента или трущихся пар. Исследование связи ЭДС с шероховатостью обработанной поверхности принимает особое значение при чистовой обработке (точение, растачивание). При этом отмечалось, что, управляя величиной ЭДС, можно снизить шероховатость более значительно, чем это удастся сделать приращением скорости резания [2]. Большинство исследователей считают, что причиной снижения микронеровностей при отсутствии тока (т.е. при компенсации ЭДС или изоляции инструмента) является уменьшение интенсивности и изменение

характера износа инструмента. Примеры практического применения электроизоляции показывают, что стойкость инструмента в среднем повышается в 1,5 – 2 раза, т.е. уменьшение износа действительно имеет место. Это имеет значение при большом расходе инструмента (например, в случае сверления стружечных отверстий в массовом производстве плашек). Вопрос о непосредственном влиянии ЭДС на шероховатость обработанной поверхности, что весьма значимо для чистовой обработки, является дискуссионным, и для изучения этого вопроса требуются дальнейшие исследования.

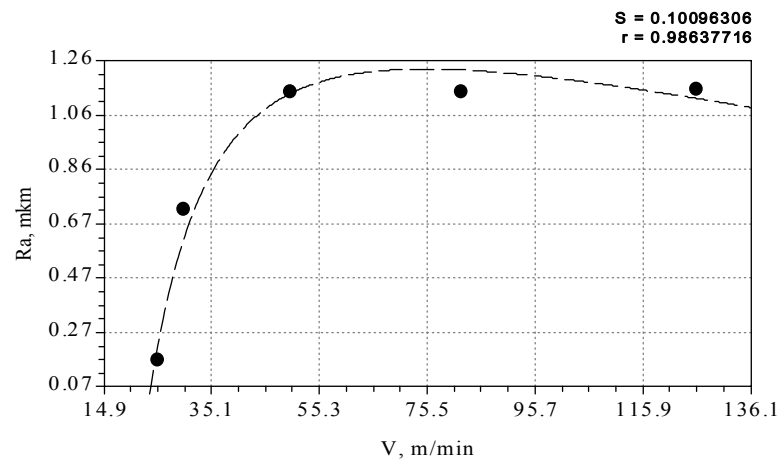
Поскольку большинство исследователей рассматривают постоянную составляющую ЭДС, представляет интерес исследовать переменную составляющую и определить степень ее взаимосвязи с шероховатостью обработанной поверхности и износом инструмента.

На кафедре «Технология машиностроения» ДонНТУ были проведены экспериментальные исследования точения стали 20 резцами с пластинами твердого сплава T5K10. Исследования проводились с изоляцией инструмента и без изоляции. Для исследования взаимосвязи ЭДС и шероховатости производились две серии экспериментов: с переустановкой заготовок и инструмента и без переустановки таковых; во втором случае изначально устанавливался электроизолированный инструмент, который для перевода в режим «без изоляции» соединялся с корпусом резцедержки экранированным шунтом. Длина пути и режимы резания выбирались исходя из необходимости исключения существенного износа инструмента. В качестве варьируемого параметра была выбрана скорость в диапазоне 25 – 135 м/мин, т.е. в зоне наростообразования. Остальные параметры были неизменны ($s=0,22$ об/мин, $t=0,25$). При каждом режиме снимались осциллограммы потенциалов ЭДС; оценивалась шероховатость путем измерения и профилографирования обработанной поверхности. По результатам первой серии опытов были построены графики зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 1) при обработке неизолированным и изолированным резцами.

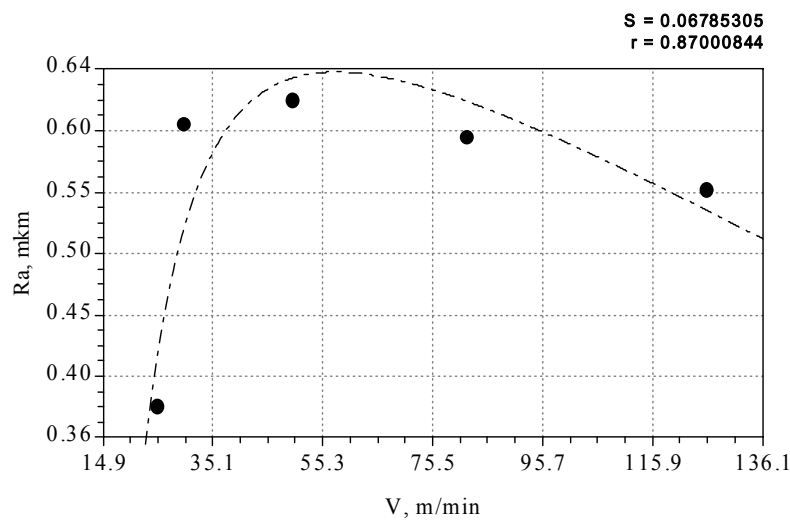
Осциллограммы при соответствующих режимах были статистически обработаны. При этом сделаны выводы, что при обработке изолированным инструментом:

- 1) шероховатость обработанной поверхности снижается по сравнению с вариантом «без изоляции»;
- 2) зона наростообразования смещается в область более низких скоростей резания;
- 3) уменьшение шероховатости обработанной поверхности связано с увеличением среднеарифметического значения ЭДС и уменьшением дисперсии и среднеквадратичного отклонения.

Вторая серия опытов подтверждает сделанные выводы. Кроме того, был произведен корреляционный и спектральный анализ потенциалов ЭДС при точении неизолированным и изолированным инструментами на скоростях v_1, v_3, v_6 указанного диапазона. Анализ был произведен с целью более детального изучения полученных колебаний ЭДС. Поскольку характер колебаний не меняется со временем, то по одной достаточно длинной записи можно определить статистические характеристики процесса.



a)



б)

Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания без прерывания (а) и с прерыванием (б) цепи ЭДС при точении малоуглеродистой стали в области наростообразования

Автокорреляционная функция ЭДС вычислена по формуле:

$$K(\tau) = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (u_i - u_m)(u_{i+\tau} - u_m), \quad (1)$$

где N – отрезок времени, соответствующий длительности анализируемого участка реализации ЭДС;

u_m – среднеарифметическое значение ЭДС на анализируемом участке;

u_i – текущее значение ЭДС;

$u_{i+\tau}$ – значение ЭДС в момент времени $(i + \tau)$

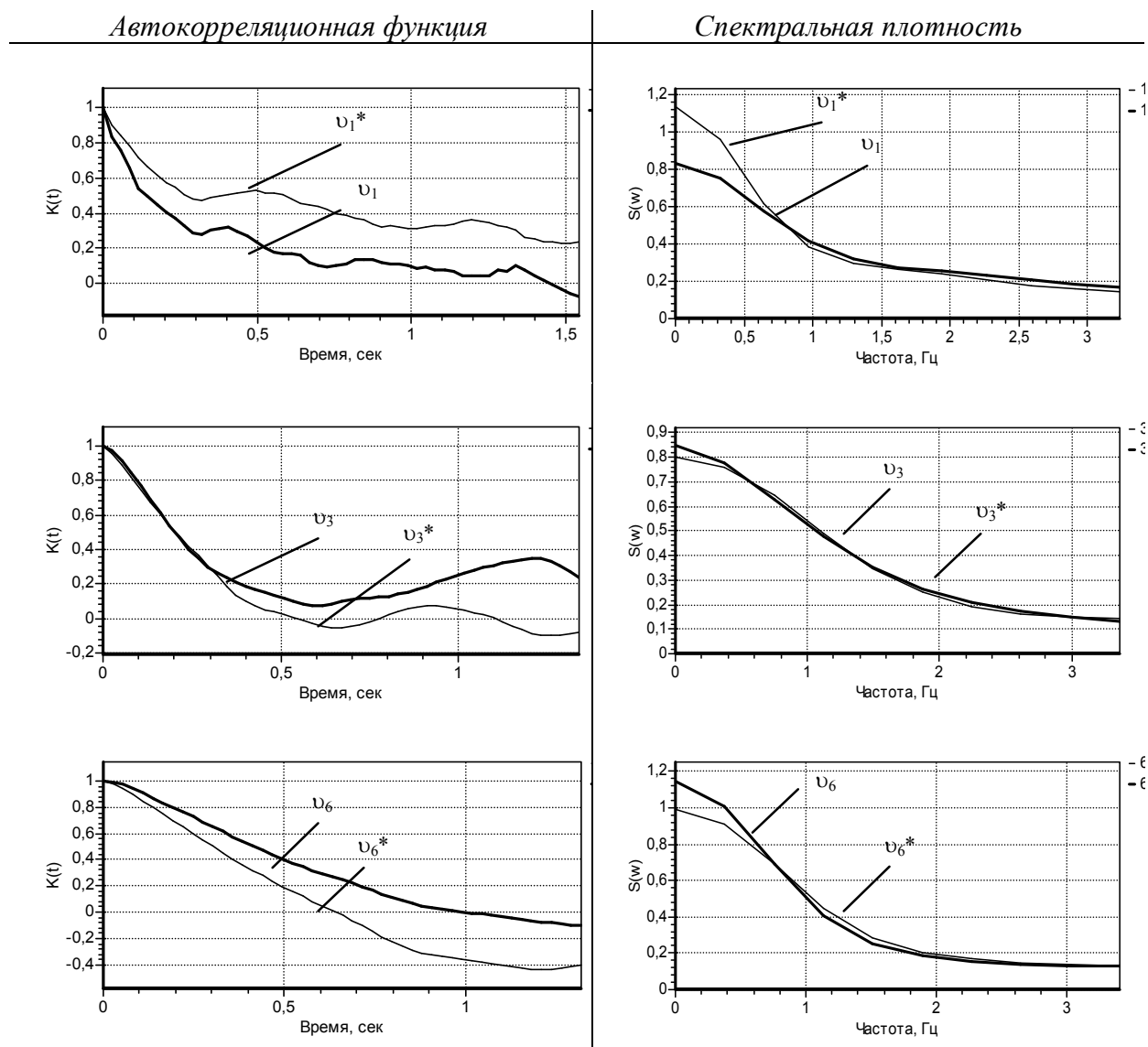


Рис. 2. Автокорреляционные функции и спектральные плотности потенциалов ЭДС (* - обработка изолированным инструментом, 1 - v_1 , 1* - v_{1*} , 3 - v_3 , 3* - v_{3*} , 6 - v_6 , 6* - v_{6*})

Как известно, автокорреляционная функция связана через преобразование Фурье со спектральной плотностью, которая может быть представлена следующей формулой:

$$S(\omega) = \frac{2}{\alpha \cdot \pi} \left[\alpha K(\tau_0) + \sum_{\tau=1}^{N/4} \left(1 - \frac{4\tau}{N}\right) \cdot K(\tau) \frac{\cos \omega \tau \cdot \sin \alpha \tau}{\tau} \right], \quad (2)$$

где ω - средняя частота колебаний ЭДС;

α - средняя амплитуда колебаний ЭДС.

Анализ полученных результатов показывает:

1) Наибольшие изменения спектров ЭДС наблюдаются в низкочастотной области.

2) С увеличением скорости резания энергия спектра ЭДС в низкочастотной области

при обработке изолированным инструментом уменьшается в большей степени, чем при обработке неизолированным инструментом.

Таким образом, колебания ЭДС отражают импульсный характер процесса резания и несут важную информацию о сложных физико-химических процессах при резании металлов, причем в случае изоляции инструмента присутствует несколько отличный механизм разрушения и физико-химических процессов, чем при отсутствии таковой.

Механизм влияния электрических импульсов на процесс трения и резания можно объяснить на основе современной теории дислокаций, согласно которой в тончайших контактных поверхностных микрообъемах происходит движение и взаимодействие дислокаций. Выход последних на поверхность приводит к образованию своеобразного субмикрорельефа в виде ступенек сдвига, оказывающего влияние на силы внешнего трения. Как показано в работе [6], между коэффициентом трения и высотой образующегося микрорельефа существует следующая связь:

$$f = 6,28(1 - \nu) \frac{\sigma_m}{G} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}} \sin \alpha, \quad (3)$$

где f - коэффициент трения;

ν - коэффициент Пуассона;

G - модуль сдвига;

σ_m - предел текучести;

ρ_1 - конечная плотность дислокаций;

ρ - исходная плотность дислокаций;

α - угол наклона плоскости скольжения.

Отношение $\frac{\rho_1}{\rho}$ в выражении (3) характеризует деформационную составляющую коэффициента трения, а конечная плотность дислокаций ρ_1 характеризует адгезионную составляющую. Тогда, воздействуя на $\frac{\rho_1}{\rho}$ и ρ_1 , можно изменять коэффициент трения.

Одним из таких воздействий являются электрические импульсы, которые, воздействуя на дислокации, влияют и на пластическую деформацию металла. Таким образом, можно предположить, что при обработке изолированным инструментом, возникающие электрические импульсы в зоне контакта с заготовкой, облегчают пластическую деформацию металла и тем самым способствуют уменьшению шероховатости обработанной поверхности по сравнению с обработкой неизолированным инструментом. Сравнивая спектры ЭДС и их статистические характеристики при обработке изолированным и неизолированным инструментом можно увидеть существенные различия. Так, уменьшение шероховатости обработанной поверхности связано с увеличением среднеарифметического значения ЭДС и уменьшением дисперсии и среднеквадратичного отклонения. По-видимому, такой вид спектра ЭДС способствует облегчению пластической деформации, что может быть связано с несколькими механизмами: большей электризацией поверхностного слоя,

уменьшением скорости окислительных процессов на ювенильных поверхностях заготовки и инструмента, упорядочиванием теплового движения электронов и др.

Таким образом, исследования показали глубокую связь между переменной составляющей ЭДС резания с износом инструмента и формированием поверхностного слоя заготовки. Проведение дальнейших исследований по данной теме открывает перспективы для создания систем управления процессом путем введения в зону резания внешних импульсов тока.

Список литературы: 1. Васильев С.В. ЭДС и температура резания // Станки и инструмент. – 1980. - №10. – С.20 – 22. 2. Коробов Ю.М., Прейс Г.А. Электромеханический износ при трении и резании металлов. – К.: Техніка, 1976. – 200 с. 3. Плотников А.Л., Таубе А.О. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: Монография / Волгоград. гос. техн. ун-т, Волгоград, 2003. –184 с. 4. Назаренко П.В. Расчет силы и коэффициента трения кристаллических тел на основе дислокационной модели внешнего трения // Проблемы трения и изнашивания, №3, - К.: Техника, 1973. 5. Аветов А.А., Афанасьев Ф.З., Бобровский В.А. О влиянии термотоков, возникающих при резании металлов, на шероховатость обработанной поверхности // Вестник машиностроения, №3, 1973. – с. 4-7. 6. Назаренко П.В. Расчет силы и коэффициента трения кристаллических тел на основе дислокационной модели внешнего трения // Проблемы трения и изнашивания, №3, - К.: Техника, 1973.

КЛАСТЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ СЛОЕВ В ЗОНЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Бутенко В.И., Демина Е.А., Анисина О.А., Скицунова А.В.
(каф. механики, ТРТУ, г. Таганрог, Россия)

Пиковый эффект потока электронов и плотности дислокаций в зоне контактного взаимодействия материалов поверхностного слоя деталей [1-3] приводит к формированию наноструктурных слоев, принципиально отличающихся по своим химическим, физико-механическим свойствам и структуре от исходных материалов и играющих определяющую роль в процессах контактного взаимодействия материалов. В зависимости от характера контактирования, шероховатости поверхностей контактируемых деталей, давления и скорости взаимного перемещения их образующийся нанометрический слой может быть дискретным (рис. 1, а) или сплошным (рис. 1, б) как разной, так и постоянной толщины.

Исследовались топография, химический состав и структура образовавшихся в зоне контакта материалов наноструктурных слоев при статическом и динамическом контактировании твердых тел. Элементный и функциональный анализ наноструктур выполнялся с использованием рентгеноспектрального анализа, ОЖЕ-спектроскопии FTIR-спектроскопии, а топография – с использованием электронной и туннельной микроскопии.

В результате исследований было установлено, что при статическом контактировании поверхностей образуется достаточно устойчивая наноструктура с ярко выраженными границами субмикрозерен (рис. 2). Микрорентгеноспектральный анализ и ОЖЕ-спектроскопия показали, что в результате взаимной диффузии атомов контактируемых

материалов, а также под воздействием электронно-дислокационных переходов в составе образующейся наноструктурной пленки находятся все химические элементы, входящие в исходные материалы (железо, углерод, медь). В то же время функциональный анализ наноструктурной пленки методом FTIR-спектроскопии (рис. 3) свидетельствует об образовании новой кристаллической структуры – кластеров Fe-Cu-C с размерами около 10^{-7} м. Одновременно отмечается высокая прочность соединения наноструктурной пленки с кристаллическими структурами контактируемых материалов.

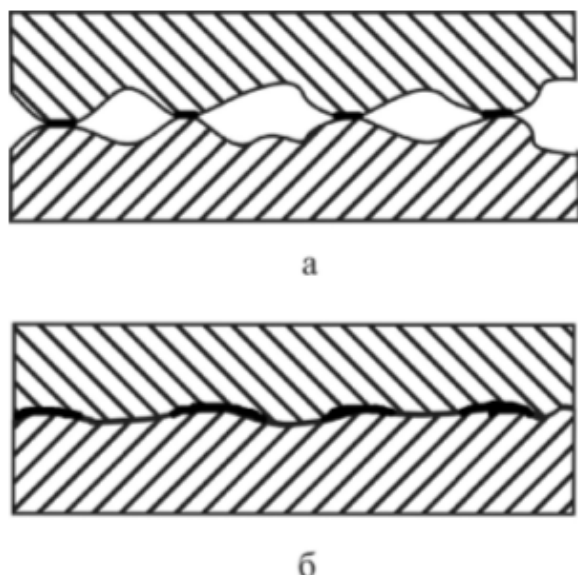


Рис. 1. Схемы вероятного контактирования поверхностей деталей с образованием дискретного (а) и сплошного (б) наноструктурного слоя

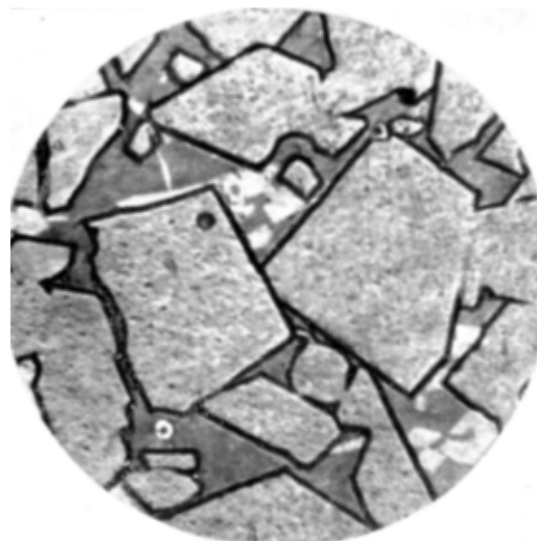


Рис. 2. Наноструктура в зоне статического контактирования стали 45 с медью М4.
Увеличение 20000

Совершенно иные кластерные образования появляются на поверхностях деталей при их динамическом контактировании. Исследование поверхности стали 45, находящейся в динамическом контакте с медью М4, методом сканирующей электронной микроскопии позволило установить, что в зоне контакта указанной пары трения образуется специфическая наноструктурная пленка, состоящая из подвижных кластеров – трибофонов [1], обладающих свойством квазиреологичности (рис. 4). Размеры образующихся кластеров изменяются в диапазоне ($10^{-7} - 10^{-6}$) м. Высокая пластичность наноструктурной пленки дает основание предположить, что она выступает основным фактором в процессах самоорганизации структур материалов деталей трибосистем [1,2].

Повышение температуры и давления в зоне контакта приводит к размыванию границ субмикроскопических зерен наноструктурных пленок и переход их в аморфное состояние с ярко выраженными направлениями течения структур (рис. 5). Подобные наноструктурные пленки, по-видимому, выполняют роль естественной смазки в зоне контактирующих поверхностей, создавая реальные возможности управления триботехническими процессами в условиях граничного трения [3]. Например, создание в трибосопрежении периодически действующего магнитного поля определенной напряженности приводит к ориентированному расположению кластеров (трибофонов), что позволяет существенно повысить износостойкость контактируемых материалов [4].

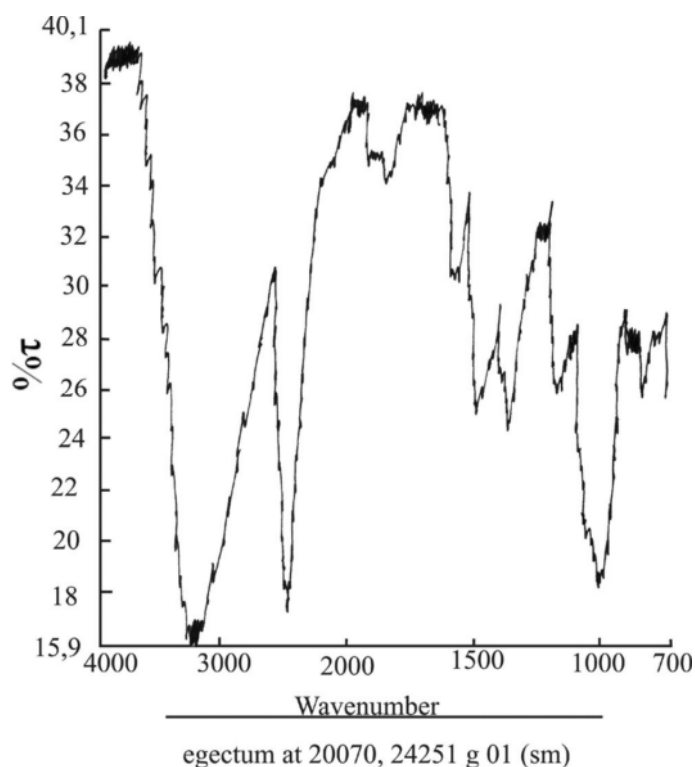


Рис. 3. FTIR – спектроскопия наноструктурного слоя при статическом контакте: сталь 45 – медь М4

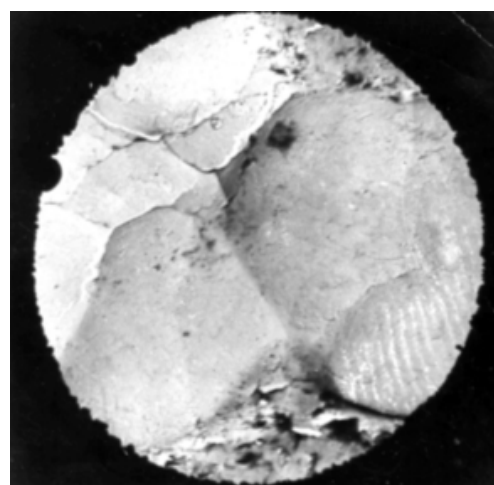
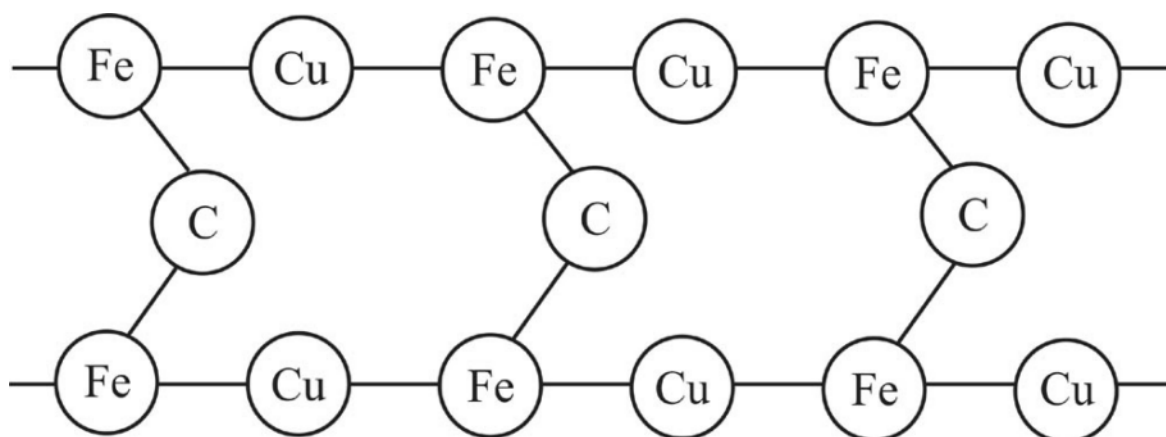


Рис. 4. Наноструктура в зоне динамического контактирования стали 45 с медью М4. Увеличение 20000

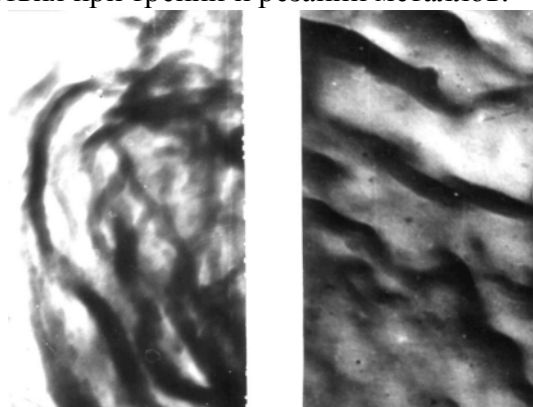
Комплекс выполненных исследований позволяет предполагать, что образующиеся в зоне контакта кластеры, из которых составляется аморфная наноструктурная пленка, имеют разветвленную сетчатую форму вида



Однако строение и химический состав наноструктурной пленки в зоне контакта зависит от составов контактируемых материалов. При контактном взаимодействии легированных сталей в наноструктурный слой диффундируют атомы включенных в состав сталей химических элементов. Количественное соотношение между железом, углеродом и легирующими элементами в наноструктурном слое обычно не соответствует хи-

мическому составу контактируемых сталей и зависит от их термоэлектрохимического потенциала и начальной электронно-дислокационной структуры.

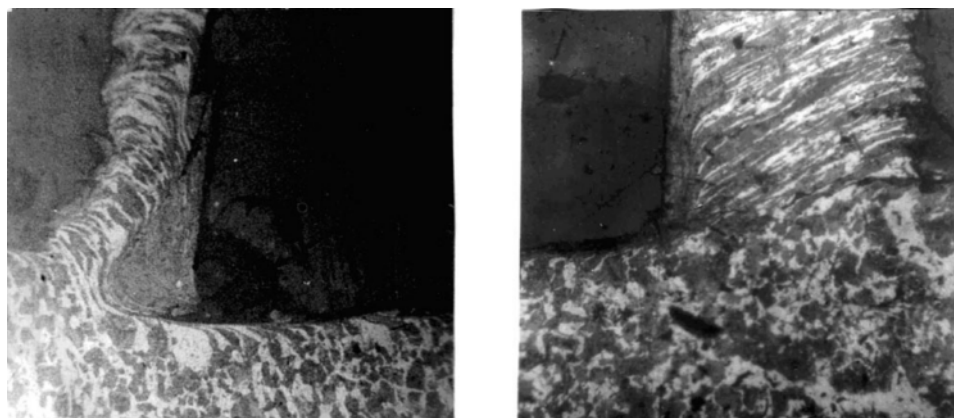
Известно, что при резании металлов на передней поверхности инструмента образуются нарост или застойная зона (рис. 6), природа возникновения которых обычно объясняется с точки зрения триботехнических явлений [5]. Установлена их многослойность, причем вдоль передней поверхности инструмента образуется тонкий наноструктурный аморфный слой жидкотекучего материала, содержащего химические элементы как обрабатываемого, так и контактируемого инструментального материалов. По строению этот слой также имеет разветвленную сетчатую форму, что свидетельствует об идентичности кластерного механизма формирования наноструктурных слоев в зоне контактного взаимодействия при трении и резании металлов.



а

б

Рис. 5. Состояние наноструктурных пленок в зоне контакта трибосистемы «сталь 45 – медь М4» а - $\theta=400\text{ }^{\circ}\text{C}$; б - $\theta=500\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p=2\text{ МПа}$. Увеличение 20000



а

б

Рис. 6 Нарост (а) и застойная зона (б), образующиеся на передней поверхности инструмента при токарной обработке стали 40Х. Увеличение 75

Исследованиями установлено [6], что именно нарост или застойная зона на передней поверхности инструмента оказывают существенное влияние на вибрационные процессы при обработке металлов резанием, а следовательно, и на качество получаемого после обработки поверхностного слоя детали.

Список литературы: 1. Бутенко В.И. Износ деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 236 с. 2. Бутенко В.И. Структурная самоорганизация материала поверхностного слоя обрабатываемой детали. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 168 с. 3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Изд-во физ-мат. литературы, 1963. – 472 с. 4. Бутенко В.И. Формирование и изнашивание поверхностного слоя деталей. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 193 с. 5. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении. – М.: Гостехиздат, 1956. – 284 с. 6. Бутенко В.И., Дуров Д.С. Совершенствование процессов обработки авиационных материалов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 127 с.

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вашурина О.Н. (каф. ТМ ЗКАТУ имени Жангир хана, г. Уральск, Казахстан)

Под качеством выпускаемой продукции понимают совокупность свойств и показателей, определяющих их пригодность для удовлетворения определенных потребностей в соответствии их назначению. Оно зависит от технического уровня машиностроения и его отдельных отраслей, определяющих большим числом факторов: совершенством, конструкцией изделий, качеством применяемых материалов, уровнем технологии и средств производства, уровнем стандартизации и др. Для оценки качества продукции разработаны показатели качества. Наиболее эффективными показателями качества изделий являются их эксплуатационные показатели. Эксплуатационные показатели – это характеристики, определяющие качество выполнения изделий заданных функций. Общими являются показатели надежности и долговечности, эргономические показатели, экономичность в эксплуатации и др. Кроме того от типа изделий установлены специфические показатели качества, например производительность и точность обработки для металлорежущих станков.

Для значительного повышения качества продукции существует Единая система государственного управления качеством продукции, важной частью которой является аттестация качества продукции. При аттестации все изделия относят к одной из трех категорий: высшей, первой или второй.

К высшей категории относятся продукция, которая по технико-экономическим показателям соответствует лучшим отечественным и зарубежным образцам или превосходит их. Изделиям этой категории присваивается государственный знак качества.

К первой категории относится продукция, отвечающая по технико-экономическим показателям, действующим стандартам и техническим требованиям.

Ко второй категории относится продукция, которая не соответствует технико-экономическим показателям и современным требованиям, морально устарела и подлежит модернизации или снятия с производства.

Классификация автоматических средств контроля

По степени автоматизации процессов средства контроля размеров могут быть разделены на:

автоматизированные приспособления (обычно светофорного типа) у которых операция загрузки, как правило, операция съема осуществляется вручную и измерительное средство сигнализирует о результатах контроля.

полуавтоматические системы, у которых операция загрузки осуществляется вручную, а все остальные автоматически

автоматические системы, у которых весь цикл работы, автоматизирован
самонастраивающие системы, у которых автоматизирован цикл настройки
по воздействию на технологический процесс автоматические средства контроля
размеров можно разделить на:

пассивные контрольные средства, осуществляющие лишь рассортировку деталей
на группы в зависимости от результатов контроля

активные контрольные средства, которые при определенном изменении контролируемой величины автоматически изменяют ход технологического процесса и обеспечивают заданную точность обработки

По способу преобразования измерительного импульса автоматические контрольные средства делят на механические, пневматические, гидравлические и электрические.

Основные методы обработки результатов измерений

Обработка результатов измерения широко применяется в производственной практике с целью установления соответствия точности выбранного технологического процесса заданной точности изделия; установление технологических допусков; определения статических характеристик установочных и выборочных партий деталей, т. е. при статическом контроле и регулировании качества продукции; установления точностных характеристик совокупности машин или приборов определенного типа и т.д.

При изготовлении партии деталей неизбежно происходит рассеивание их размеров. Поэтому результат измерения конкретной детали является случайной величиной. Вследствие этого для обработки результатов измерений используют методы теории вероятности и математической статистики, позволяющие находить статические параметры эмпирического распределения, а также устанавливать параметры теоретического распределения, которое наиболее близко соответствует исследуемому эмпирическому распределению. Для измерения массивных деталей очень сложной пространственной форме; пресс-форм, блок-цилиндров двигателей, коробок передач, коллекторов, задних мостов автомобилей и др. наиболее экономичным является применение координатно-измерительных машин (КИМ).

В комплект КИМ входят ЭВМ, алфавитно-цифровой дисплей, алфавитно-цифровое печатающее устройство, самопишущее устройство, пульт дистанционного управления и программирования, многоточечное измерительные щупы сигнальная (сканирующая) головка, поворотный стол для групповых измерений, набор программ, математического обеспечения для решения комплексных задач измерения, микроскопы, приспособления для закрепления деталей, магазины со сменными измерительными головками, устройства для ввода программ. и т. д.

Приборы, управляющие процессом обработки

Приборы управляющие процессом обработки, можно применять только в том случае, если исполнительные органы технологического оборудования могут воспринимать и осуществлять с заданной точностью до 0,002 мм принятые команды. Контроль проводится до обработки детали и после нее (при шлифовании, хонинговании, токарных, фрезерных, доводочных и ряда других технологических операций).

Лазерные приборы

Лазерные приборы предназначены для высокоточного измерения линейных перемещений, например координатных перемещений в станках с числовым программным управлением, координатно-измерительных машинах и других устройствах, воспроизводящих точные линейные перемещения.

Кроме того, лазерные приборы позволяют проводить высокоточные измерения угловых перемещений, измерение прямолинейности поверхностей.

Принцип действия прибора основан на лазерной интерферометрии. В качестве источника светового излучения служит He-Ne – лазер. Применение лазерных приборов обуславливает жесткие требования к внешним условиям окружающей среды: температуре, влажности, скорости воздушного потока, вибрации в процессе измерений, что ограничивает их широкое использование.

Список литературы: 1. «Справочник контролера машиностроительного завода» под редакцией А.И. Якушева. Москва «Машиностроение», 1980. 2. «Справочник технолога» под редакцией А.А. Панева. Москва «Машиностроение», 1988.

РАЗМЕРНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОБРАБОТКОЙ ППД ПРОГРАММНЫМ СПОСОБОМ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Водянина М.В. (каф. ТМ, БГТУ, г. Брянск, Россия)

Вопрос восстановления размеров изношенных поверхностей в машиностроении стоит достаточно остро, так как полная замена детали зачастую может обходиться очень дорого. Одним из путей решения этой задачи может быть восстановление размера путём выдавливания металла при нанесении канавок на поверхности с определённым шагом.

Нанесение канавок может осуществляться методом поверхностно пластического деформирования шариком, троидальным роликом или алмазным выглаживанием (АВ).

АВ – обработка более предпочтительная т. к. при этом не требуется приложение большой нагрузки и синтетический алмаз обладает высокой износостойкостью и теплостойкостью, что позволяет повысить производительность обработки. Это во-первых. Во-вторых при АВ имеет место процесс трения скольжения индентора об обрабатываемую поверхность в отличие от двух предыдущих случаев. Это позволяет получить после обработки поверхность с более высокими триботехническими свойствами.

Анализируя профилограммы поверхности после пластической деформации поверхностного слоя образцов из латуни, имеющих исходную шероховатость было отмечено, что в зависимости от шага нанесения канавки сферическим алмазным индентором может происходить:

а) пиковое вспучивание микропрофиля на величину ΔY_0 при этом микротвёрдость поверхности $H_{\mu 01}$ будет выше исходной $H_{\mu 0}$ (рис 1 б);

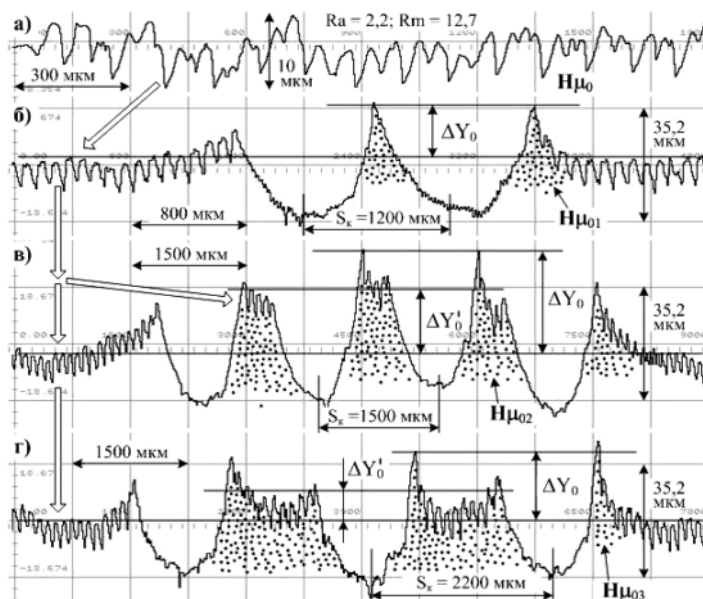


Рис. 1. Пластические деформации поверхностного слоя образцов из латуни при обработке исходной поверхности (а) нанесением алмазным индентором канавок с шагом S_K , равным 1,2 мм (б), 1,5 мм (в) и 2,2 мм (г) и режимами: $V = 50$ м/мин, $Q = 550$ Н

б) при увеличении шага нанесения канавок с $S_K=1200$ мкм до $S_K=1500$ мкм при тех же режимах обработки выросла общая величина вспучивания ΔY_0 , имеющая пиковый характер, и кроме того вспучилась поверхность с исходной шероховатостью на высоту $\Delta Y'_0$ большую, чем величина ΔY_0 в предыдущем случае. При этом высота поверхностной микротвёрдости будет составлять величину $H_{\mu 02}$ (рис. 1 в);

в) дальнейшее увеличение шага между канавками до $S_K=2200$ мкм приводит к картине, подобной рассмотренной в случае б) Однако величины ΔY_0 , и $\Delta Y'_0$ значительно меньше. Высота поверхностной микротвёрдости будет составлять величину $H_{\mu 03}$ (рис 1 г);

Проведенный анализ свидетельствует о том, что шаг нанесения канавок алмазным индентором имеет оптимальную величину, критерием оптимума которой является условие: $\Delta Y'_0 = \max$, то есть максимум выдавливания поверхности, имеющей исходную шероховатость в деформированном виде на максимальную высоту, что даст максимальный эффект восстановления диаметрального размера (рис. 2). При этом второй случай более предпочтителен, так как острые пики выдавленной поверхности, определяющие величину Y_0 , подвергнутся быстрому интенсивному изнашиванию в начальный период работы восстановленной поверхности детали.

Для получения имитационных моделей формирования указанных величин был проведён активный эксперимент над образцами из латуни Л60 с включением в него следующих факторов: максимальная высота шероховатости исходной поверхности R_{\max} ; сила алмазного выглаживания Q . Вместо шага τ между канавками было решено ввести относительную величину, равную его отношению к радиусу индентора τ/r . Это связано с тем, что при одном и том же шаге τ обработка инденторами с различными радиусами r даст совершенно разные эффекты.

Если сравнить возможные значения ΔD при обработке латуни ($\Delta D = 2Y_{0п} = 18...78$ мкм) со значениями допусков, то видно, что восстановление размеров деталей из

латуни в интервале $D_{\text{ном}}$ от 3 до 80 мм выдавливанием путём нанесения канавок алмазным индентором теоретически возможно с 01 по 9 квалитет точности включительно.

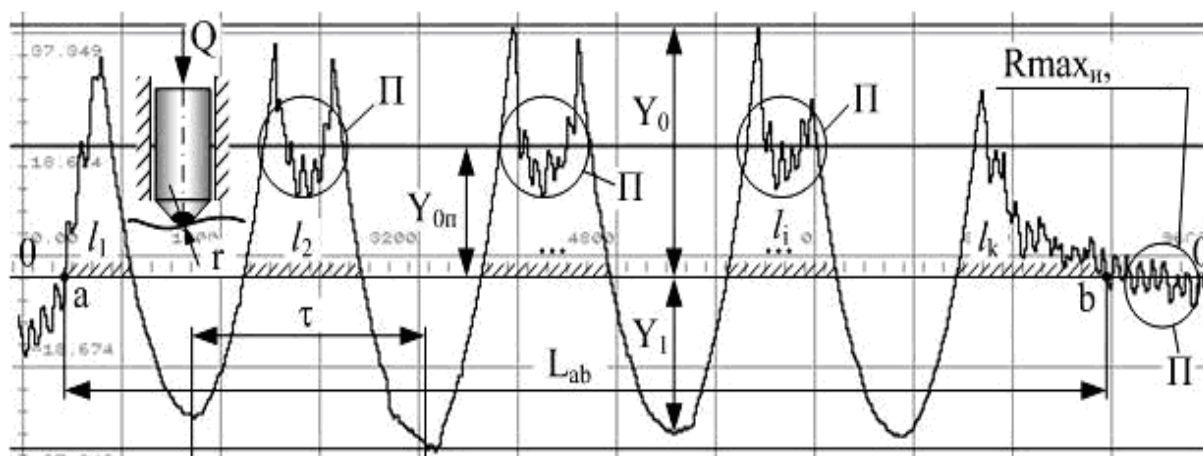


Рис. 2. Геометрические характеристики поверхности при размерном восстановлении выдавливанием алмазным индентором канавок с шагом τ с силой Q : Y_0 – максимальная величина выдавливания относительно линии выступов "0 – 0" восстанавливаемой поверхности; Y_1 – максимальная величина вдавливания поверхности относительно линии выступов "0 – 0"; $Y_{0п}$ – высота выдавливания поверхности с исходным профилем П относительно линии выступов "0 – 0"

Относительная опорная длина восстановленного профиля на уровне выступов исходного профиля $tp_{\text{ов}}$ на длине восстанавливаемой поверхности $L_{\text{аб}}$ [мкм] (рис. 2), определяется по формуле:

$$tp_{\text{ов}} = \frac{1}{L_{\text{аб}}} \sum_{i=1}^k l_i.$$

Она колеблется в пределах от 0,21 до 0,54.

Расчёт оптимальных режимов восстановления должен обеспечивать $tp_{\text{ов}} = \max$ при условии $Y_{0п} = [Y_{0п}]_{\text{зад}}$ – заданная величина.

Обработка результатов эксперимента позволила получить параметры имитационных моделей исследуемых характеристик. Так, имитационная модель для параметра $Y_{0п}$ (рис. 2) имеет вид:

$$Y_{0п} = 0,9 \cdot 10^{-10} \frac{R \max_u^{0,006} \cdot Q^{3,1}}{(\tau/r)^{2,18}}, [\text{мкм}].$$

Стратификация факторов размерного восстановления позволяет сделать следующие выводы. Если рассматривать совокупное влияние факторов Q , $R \max$, τ/r на все параметры, то их можно проранжировать в следующем порядке: Q (6) $\rightarrow R \max$ (7) $\rightarrow \tau/r$ (11) (Рис. 3). Цифры в скобках соответствуют набранной сумме мест при стратификации. Если рассматривать параметры Y_0 и $Y_{0п}$, которые и определяют величину восстановления ΔD , то естественно, главным здесь является фактор Q . Относительно слабое влияние параметра τ/r , выявленное при обработке результатов данного эксперимента, ни коем случае не свидетельствует о его незначимости, так как его уровни были выбраны на базе предварительных экспериментов вблизи оптимального значения.