

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт математики, физики и информационных технологий
(наименование института полностью)
Кафедра «Прикладная математика и информатика»
(наименование кафедры)
01.04.02 «Прикладная математика и информатика»
(код и наименование направления подготовки)
Математическое моделирование
(профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Математическое моделирование процесса электроискрового
легирования

Студент

Логинов Н.Ю.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Талалов С.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Допустить к защите

Заведующий кафедрой: к.т.н, доцент А.В. Очеповский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	4
2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЭИЛ	24
2.1 Математическое моделирование процесса упрочнения режущего инструмента методом ЭИЛ	26
2.2 Оптимизация процесса нанесения покрытий методом электроискрового легирования	41
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ	47
3.1 Металлографические исследования опытных образцов с нанесенным покрытием из твёрдых сплавов, не содержащих вольфрам	47
3.2 Трибологические исследования образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом	54
3.3 Моделирование динамики коэффициента трения с помощью дамми- переменных	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	68
ПРИЛОЖЕНИЯ	74

ВВЕДЕНИЕ

Процесс взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала может быть описан следующим образом: режущий инструмент, имеющий большую твердость, воздействует на заготовку из более мягкого материала и срезает поверхностный слой. При этом срезанный слой удаляется из зоны обработки в виде стружки.

Между заготовкой и инструментом, а также между стружкой и инструментом возникают силы трения, изнашивающие режущий инструмент. Твердость режущего инструмента играет большую роль. Чем выше твердость инструмента, тем дольше период его стойкости, если не считать поломки инструмента, зависящие от хрупкости, которая в этом случае также растет.

Для увеличения твердости инструмента, изготовленного из инструментальной стали, предлагается наносить на режущую поверхность покрытие из твердого сплава методом электроискрового легирования (ЭИЛ).

Целью магистерской диссертации является разработка математической модели процесса электроискрового легирования.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Максимально полная физическая модель нанесения покрытий электроискровым легированием (ЭИЛ) представлена в работе [1, 2], где детально проанализировано взаимодействие катода с упрочняющим анодом-электродом, взаимодействующими в условиях вибраций. При применении в качестве анода компактных электродов наибольшее распространение получил такой вариант обработки, когда взаимодействие анода с катодом осуществляется в условиях вибрации. Пробой промежутка между электродами при напряжениях $U_p=15\dots 200$ В получается на дистанциях, равных $0,01\dots 10$ мкм. ЭИЛ возникает с момента приближения анода к катоду на определенное расстояние. В этот момент возникает пробой межэлектродного зазора [3, 4]. Спустя 10^{-7} - 10^{-8} с с поверхности взаимодействующих электродов начинается испарение материалов и выброс жидкого металла путем его мелкого диспергирования. Пары и жидкости в себе несут некоторый запас энергии, который зависит от параметров разряда и теплофизических свойств материала легирующего электрода. Так как эти процессы происходят в очень малом межэлектродном зазоре, который постоянно уменьшается, то создаются подходящие условия для обмена потоками энергии между электродами. Под воздействием электродно-ионной компоненты плазмы и паровых жидкостных потоков в местах энерговыделения и электродах формируются расплавленные объёмы в форме лунок. По мере действия импульсного разряда выброс капельно-жидкой фазы и паров может протекать уже с поверхности образующегося расплава. Выброс жидкости и пара и уменьшение межэлектродного промежутка приводят к внушительному росту давления в зазоре.

При импульсах электрического тока определенной продолжительности электроды успевают сойтись практически до соприкосновения еще до завершения разряда. Но настоящего контакта между катодом и анодом, по мнению [1-4], не происходит в связи с тем, что в районе испарения давление

металлических паров может достигать до 10^8 Па [5, 6], что, например, значительно превосходит давление, формируемое в зоне контакта электромагнитной вибрационной системой.

При начале контактного пробоя на первой стадии процесса совершается электрический взрыв контакта, что формирует поверхностную очистку и последующую организацию пространства между взаимодействующими электродами для воздействия уже плазменного этапа разряда [7].

На сблизившиеся жидкие объёмы катода и анода воздействует несколько сил: газокINETическое удаление и гидродинамическое давление, идущие со стороны канала, магнитное воздействие электрического поля, реактивное давление, электродинамическая сила. Под воздействием результирующей действия перечисленных сил объём жидкого металла сначала деформируется, а потом выбрасывается из лунки. В связи с тем, что это получается практически при контакте, то возможно соединение жидких фаз электродных материалов и их интенсивное перемешивание.

За счет эффекта полярности в некоторых случаях часть жидкой фазы, формирующейся на аноде может быть гораздо большей, чем на катоде, и получаемый поверхностный слой на изделии может содержать в основном материалы анода. Процесс гидродинамического перемешивания способствует тому, что распределяется в данном слое по всему объёму, включая поверхность и материал катода.

При некоторых режимах электроискрового упрочнения, где процессы переноса и эрозии могут происходить ещё до непосредственного контакта электродов, формируются более благоприятные условия для организации необходимых поверхностных слоев, основу которых составляет материал анода. Однако, в таком случае не исключено наличие в них материалов электрода (катода), проникших туда за счет газообразной составляющей разрядов.

При электроискровом упрочнении взаимодействие жидкостных фаз и кристаллизация материалов электродов проходит главным образом на

поверхности катода. По взгляду авторов [1, 2] расплавы катода и анода взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой, что в результате приводит к изменению физико-химических свойств поверхности катода и отчасти анода.

В поверхностных слоях анода также присутствует материал катода, где в результате склонности материалов электродов к схватыванию и перемешивания жидких фаз формируется поликомпонентная жидкая фаза.

По окончании разряда и кристаллизации электродных материалов на поверхности возникает следующая фаза процесса электроискрового легирования. В данной фазе происходит активное физическое взаимодействие между катодом и анодом. Осциллографирование свидетельствует, что длительность контактирования при электроде, совершающем вибрации частотой до 100 Гц, на много дольше времени импульсов тока и находится в пределах от 0,5 до 2 мс.

Фаза, завершающая процесс, начинается при снижении механического давления между катодом и анодом. Это связано с отводом упрочняющего электрода от заготовки. Эта фаза заканчивается разрывом электрической цепи при удалении электрода от заготовки на расстояние, которое значительно превышает пробивное. Данное расстояние обыкновенно соответствует амплитуде вибраций.

Если при ЭИЛ используются источники импульсов, которые имеют разобщенные разрядные и зарядные цепи, то при отводе анода от катода между ними не происходит эффекта размыкания. При использовании в процессе RC-генераторов возможно появление короткой дуги, которая обусловлена разрывом системы контакта. Как показывает опыт при несильных режимах ЭИЛ ($U_p=15...50$ В) дуги не возникает вовсе. Это связано с тем, что за период разрыва контакта в системе переходных процессов напряжение конденсатора не достигает наибольшего значения потенциала возникновения короткой дуги [5]. При ещё более больших U_p возникновение короткой дуги существенно не влияет на процесс, так как

эрозия электродов в таком случае ничтожно мала в случае разряда конденсатора.

Кинематическая модель такого процесса описывается в [8]. Там говорится, о модели ЭИЛ, которая происходит за время начального этапа процесса эрозии при разряде конденсаторной батареи.

Уравнение колебаний системы записывают таким образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx + h \frac{dx}{dt} = F \cdot \cos(\omega \cdot t) + P, \quad (1.1)$$

где k – упругая сила пружин вибратора;

m – масса электрода;

h – коэффициент трения;

$F \cdot \cos(\omega \cdot t)$ – внешняя сила, возбуждаемая электровибратором при частоте ω ;

P – динамическая (статическая) сила, прилагаемая рабочим к упрочняющему электроду.

Общее решение выражения (1.1) зависит от характера изменения силы P .

При условии что оператор прижимает электрод с неизменным усилием, а коэффициент трения прямо пропорционален скорости перемещения электрода, то электрод будет подходить к поверхности заготовки со скоростью

$$A_{\text{э}} = \frac{a \cdot 2\pi}{T_{\text{э}}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{э}}}\right)t - \frac{b \cdot 2\pi}{T_{\text{э}}} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{\text{э}}}\right)t - \gamma C_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega \cdot t + \alpha) - C_0 \omega \cdot e^{-\gamma t} \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (1.2)$$

$$a = F \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega \cdot \gamma)^2};$$

$$b = \frac{2F \cdot \gamma \cdot \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega \cdot \gamma)^2};$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m};$$

$$\gamma = \frac{h}{2m};$$

где C_0 и α - параметры начальных условий перемещения электрода.

$T_{\text{э}}$ – период колебаний электрода;

Таким образом, до возникновения импульса тока совершается механическая деформация вершук микронеровностей электродов от динамической и статической нагрузки, что создает условия для дополнительного нагрева деформированных микрообъемов материалов и их активация.

Если площадь тока превысит критическое значение, то мостики связи на малых микронеровностях начинают плавиться.

Эрозия упрочняющего электрода и перенос его материала на поверхность заготовки возникает за счёт несимметричного распределения тепла в критической точке каналов связи, которые формируются при замыкании катода и анода. При этом энергия всего тока, протекающего по мостикам связи, расходуется на плавление материалов, а при последующем прохождении электродов, между ними образовывается расплав. Мостик отрывается у основания легирующего электрода, так как скорость остывания расплавленного материала на поверхности много выше. Наличие этого эффекта экспериментально подтверждено в работах [6, 9], где говорится, что массоперенос направлен в сторону того из электродов, который находится дальше от максимально нагретого места, обычно этим электродом является катод (заготовка). [10]

«Расхождение электродов происходит по двум причинам. Во-первых, легирующий электрод, закончив движение к поверхности детали, возвращается к исходному положению. Во-вторых, легирующий электрод, не достигнув низшей точки своего движения, отходит от поверхности детали под действием динамических сил, возникающих от взрывного оплавления мостиков связи в результате действия тепла Джоуля – Ленца, если плотность тока в контактной области выше некоторого критического значения». [10]

Поэтому под воздействием взрывной энергии между электродами может формироваться зазор, который наполнен плазмой. Он действует очень

короткое время. Его величина зависит от мощности разряда, скорости коммутации электрической цепи и теплофизических характеристик участвующих в процессе веществ.

Если не завершено движение к нижней точке, то упрочняющий электрод возвращается к поверхности детали. В таком случае процесс упрочнения может иметь два продолжения. Первое, когда $t_{и} < t_{п}$, упрочняющий электрод проникает в легированные объёмы основного материала. Второе – это при завершении конденсаторного разряда, если период короткого электрического замыкания, отскок и возврат легирующего электрода $t_{п}$, меньше времени импульсов тока $t_{и}$.

Следовательно, с точки зрения теории имеет весомое значение определение времени действия короткого электрического замыкания, площади каналов пробоя и динамические характеристики их изменения, а также определение взаимного приближения электродов под воздействием пластических деформаций микронеровностей.

«Процесс диффузии, происходящий при образовании покрытий, может служить объяснением связи между катодом и основой. Однако, поскольку процесс диффузии кратковременный и протекает медленно, то диффузия практически отсутствует». [11] Результаты экспериментов, которые свидетельствуют о диффузии материала анода в катод, приведены в работах [12, 13].

Авторы [14] описывают, что возникновение электрического разряда в установках с тиристорным источником питания, к которым относятся и установки Элитрон-22 и Элитрон-12, является контактным. Это значит, что некоторое количество электродных материалов будет выброшено в межэлектродный зазор по причине взрыва контактных площадок еще до появления электроразрядной плазмы. При этом представляется возможным, что значительная часть этих материалов будет выброшена из конусообразного противоэлектрода. Это значит, что такой процесс не оказывает значимого влияния на окончательные размеры лунок. [15]

Следовательно, мы можем считать, что объём лунки, рассчитанный как объём шарового сегмента по формуле

$$V_{л} = \frac{1}{6} \pi \cdot h_{л} \cdot (r_{л}^2 + 3r_{л}^2), \quad (1.2)$$

где $r_{л}$ – радиус лунки, м,

$h_{л}$ – глубина лунки, м,

в основном соответствует объёму материала, выброшенному в течение разряда из рассматриваемого электрода. Отсюда масса выброшенного материала равна:

$$M_{изм} = \rho \cdot V_{л}. \quad (1.3)$$

Интерес представляет практическое определение энергии, которая выделяется в межэлектродном промежутке. Авторами [1, 2, 15] описано, что величина энергии, которая запасается в конденсаторе

$$W_c = \frac{c \cdot U_{x.x.}^2}{2}. \quad (1.4)$$

Она всегда больше реальной энергии, выделившейся в импульсном разряде

$$W_u = \int_0^{\tau_u} U(\tau) \cdot I(\tau) dx. \quad (1.5)$$

Результаты численного рассмотрения большого числа осциллограмм показали, что значения энергии, которая выделилась в импульсном разряде, довольно точно аппроксимируется выражением

$$W_u = k_1 \cdot U_{\alpha} \cdot I_{\alpha} \cdot \tau_u \approx 0,25 \cdot U_{\alpha} \cdot I_{\alpha} \cdot \tau_u. \quad (1.6)$$

Интенсивность поверхностного теплового источника определяется формулой:

$$q = \frac{\partial^2 W_{из}}{\partial \tau \cdot \partial S}, \quad (1.7)$$

где S – площадь источника, м²;

q – плотность потока тела, Вт/м²;

$W_{иэ}$ – энергия, выделившаяся на электроде, Дж.

Так как распределение потока тепла по площади источника не определено ни экспериментально, ни теоретически [16, 17], то можно приблизительно принять тепловой поток нормально распределенным по площади источника, соотнеся площадь источника с площадью лунки [16]. В таком случае 0,9 доли всего потока придется на 0,3 площади лунки, то есть

$$q = \frac{k_2 \cdot W_{иэ}}{\tau_u \cdot S_l} \approx \frac{3 \cdot W_{иэ}}{\tau_u \cdot S_l} \quad (1.8)$$

Следовательно, для определения интенсивности поверхностного источника тепла нужно знать следующие характеристики доли передачи импульса и площади лунки, приходящейся на заданный электрод. Это было определено авторами экспериментально и далее оценено из ранее высказанных соображений. Согласно [18], рассматриваемый разряд развивается по типу короткой дуги с возможностью перехода к свободно горящей дуге при повышении парового давления и плотности плазмы в межэлектродной щели. На стадии короткой дуги при этом плазменный разрядный столб мало выражен, и энергетический вклад в межэлектродный промежуток пренебрежительно мал по сравнению с энергией, выделившейся на поверхностях электродов. Поэтому энерговыделение в основу (катод) будет зависеть от ионной компоненты в общей мощности разряда, которая для дуг оценивается в $k_{з1} \approx 0,1 - 0,3$ [19], а доля в анод – $k_{зе} = 0,7 - 0,9$ [20]. Следовательно, интенсивность поверхностного источника тепла на электроде может быть оценена следующим образом:

$$q = \frac{I_\alpha \cdot U_\alpha}{S_l} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (1.9)$$

где $k_1(0,25)$, $k_2(3,0)$ – коэффициенты, учитывающие усреднение потока по времени и площади источника соответственно;

k_3 – коэффициент, учитывающий долю в общем токе разряда ионной и электронной составляющих.

Авторы [21] свидетельствуют, что мнения о влиянии электродных материалов на физико-химические свойства и процесс электроискрового легирования нет общепризнанной точки зрения. Некоторые исследователи отмечают, что упрочнение основного материала в электроискровом разряде происходит в результате термического влияния искры [22-25]. Авторы [6, 27] связывают упрочнение с массопереносом материала легирующего электрода на катод. В некоторых источниках говорится, что упрочнение происходит как из-за переноса материалов электродов, так и в результате термического воздействия искрового разряда [28, 29, 30]. Анализ собственных исследований авторов и литературных данных позволяет сделать следующие выводы:

1) Процесс ЭИЛ происходит за счет осаждения материала катода на поверхности анода [26, 27, 28, 30, 31]. ЭИЛ наиболее эффективно, если в качестве упрочняющего электрода используется материал большей твердости и износостойкости:

$$H_{\text{упр}} = f(M_a), \quad (1.10)$$

где M_a – характеристика материала упрочняющего электрода.

2) Поверхностный слой является результатом взаимодействия материалов анода и катода с образованием химических соединений, твердых растворов, нитридов, окислов [28, 31, 32, 33]. В таком случае

$$H_{\text{упр}} = f(M_a + M_k, P_o + H_c), \quad (1.11)$$

где $P_o + H_c$ – эффект упрочнения, результатом которого является образование окислов и нитридов;

$M_a + M_k$ – эффект от взаимодействия материалов электродов.

3) ЭИЛ происходит как за счет взаимодействия материалов электродов, так и за счет импульсного воздействия давления и высоких температур, которые приводят к появлению новых фаз, крайне неравновесных структур, дроблению зерна [33], тогда

$$H_{\text{упр}} = f(M_a + M_k, P_o + H_c, T). \quad (1.12)$$

Авторами [34] модель процесс электроискрового нанесения покрытий описывается следующими зависимостями. Ток рассчитывается формулой:

$$I = U / \sum_{i=1}^7 R_i, \quad (1.13)$$

где I – проходящий через участки электрический ток; U – напряжение в цепи в схеме замещения; R_i – сопротивление каждого участка электрода.

Изменяющееся напряжение описывается тремя линейными законами:

$$U_1(t) = \begin{cases} At / \tau, 0 < t < \tau \\ 0, \tau < t < T \end{cases},$$

$$U_2(t) = \begin{cases} A, 0 < t < \tau \\ 0, \tau < t < T \end{cases}, \quad (1.14)$$

$$U_3(t) = \begin{cases} At / 4 \cdot 10^{-6}, 0 < t < 4 \cdot 10^{-6} \\ At / (\tau - 4 \cdot 10^{-6}), 4 \cdot 10^{-6} < t < \tau, \\ 0, \tau < t < T \end{cases}$$

«где A – амплитуда напряжения подающегося в цепь схемы замещения; τ – длительность импульса, мкс; T – период импульса, мкс; t – время легирования, мкс». [34]

Массу электродных участков определяют зависимостью:

$$m_i = \rho_i \cdot V, \quad (1.15)$$

«где m_i – масса i – того участка электрода, кг; ρ_i – плотность материала, кг/м³; V – объем участка, м³». [34]

$$m_4 = 2\rho_4 \cdot \int_{y=0}^L s(y)dy, \quad (1.16)$$

«где ρ_4 – плотность, кг/м³; $s(y)$ – площадь сечения в зависимости от координаты y , м²». [34]

«Коэффициенты h , c , λ , ρ зависят от температуры, которую необходимо определить. Для определения температуры на участках надо решить следующую систему уравнений» [34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 I^2 t = c_1 m_1 (T_1 - T_{01}) + s_{1нов} h_1 (T_1 - T_0) + \frac{\lambda_1 s_1 t (T_1 - T_2)}{\sqrt{\chi_1 t}} \\ R_2 I^2 t = c_2 m_2 (T_2 - T_{02}) + s_{2нов} h_2 (T_2 - T_0) + \frac{\lambda_2 s_1 t (2 \cdot T_2 - T_3 - T_1)}{\sqrt{\chi_2 t}} \\ R_3 I^2 t = c_3 m_3 (T_3 - T_{03}) + s_{3нов} h_3 (T_3 - T_0) + \frac{\lambda_3 s_1 t (2 \cdot T_3 - T_4 - T_2)}{\sqrt{\chi_3 t}} \\ R_4 I^2 t = c_4 m_4 (T_4 - T_{04}) + s_{4нов} h_4 (T_4 - T_0) + \frac{\lambda_4 t (T_4 (s_1 + s_5) - T_3 s_1 - T_5 s_5)}{\sqrt{\chi_4 t}}, (9) \\ R_5 I^2 t = c_5 m_5 (T_5 - T_{05}) + s_{5нов} h_5 (T_5 - T_0) + \frac{\lambda_5 s_5 t (2T_5 - T_4 - T_6)}{\sqrt{\chi_5 t}} \\ R_6 I^2 t = c_6 m_6 (T_6 - T_{06}) + s_{6нов} h_6 (T_6 - T_0) + \frac{\lambda_6 s_5 t (2T_6 - T_5 - T_7)}{\sqrt{\chi_6 t}} \\ R_7 I^2 t = c_7 m_7 (T_7 - T_{07}) + s_{7нов} h_7 (T_7 - T_0) + \frac{\lambda_7 s_5 t (T_7 - T_6)}{\sqrt{\chi_7 t}} \end{array} \right. \quad (1.17)$$

«Для решения системы применяли коэффициенты, которые были определены при предыдущей температуре участков». [34]

«Систему линейных уравнений решали методом Крамера. Находили главный определитель, затем определители, полученные с помощью замены столбца (последовательно для каждого) на правую часть системы. Температура находится делением полученных определителей на главный». [34]

«Участок в цепи получает энергию от протекающего тока $R_i I^2 t$, которая расходуется на нагрев ($T_i > T_{i+1}$) от соседнего участка $\frac{\lambda_i s_i t (T_i - T_{i-1})}{\sqrt{\chi_i t}}$, часть тепла участок отдает в окружающую среду $S_{инов} h_i (T_i - T_0)$, а остальную энергию тратит на нагрев самого участка $c_i m_i (T_i - T_{0i})$ ». [34]

Боковую поверхность участка R4 находили по формуле:

$$S_{4нов} = 2\pi \cdot \int_{y=0}^t (r_1 + r_2) \cdot \sqrt{y^2 + (r_1 + r_2)^2} \cdot dy \quad (1.18)$$

«В системе линейных уравнений для определения температуры используются следующие константы $h, \rho, \lambda, c, \chi$ ». [34]

«Таким образом, разработанная упрощенная модель процесса электроискрового легирования наглядно позволяет рассматривать с

определенной погрешностью различные процессы, происходящие на поверхности и внутри электродов. Однако необходимо указать на ряд допущений, которые приняты при проведении анализа. Значения констант принимались при комнатной температуре, что не учитывает реальные условия проведения процесса». [34]

Основными моментами следующей модели «являются: проковывание легированного слоя в процессе обработки, диффузионное взаимодействие материалов электродов и эродирование материала анода только в жидкой фазе. Последующее совершенствование ЭИЛ тесно связано с развитием теоретических и экспериментальных исследований электрофизических параметров плазмы при разряде, возникающем при периодической коммутации электродов. Электронная плотность плазмы n_e и температура T_e при этом являются характеристиками, задаваемыми в качестве известных в результате теоретического анализа». [35]

«Большие значения растягивающих напряжений на рабочей поверхности электрода являются основной причиной образования трещин и твердофазной эрозии, вклад которой в общий эрозионный эффект зависит от режимов обработки и гомеоплярности межатомной связи в материале электрода». [35]

Наибольший перенос материала легирующего электрода на катод зависит от соотношения эрозии материалов электродов:

$$\Delta_a \gg (\Delta_m^k + \Delta_{\text{эп}}^k). \quad (1.19)$$

«При использовании критерия взаимодействия материалов ЭИЛ и пользуясь выражением относительной эрозионной стойкости, неравенство (1.19) можно перевести в вид» [35]

$$\frac{\Delta_a}{\Delta_m^k + \Delta_{\text{эп}}^k} \frac{C_k \cdot \rho_k \cdot \lambda_k \cdot \left(\epsilon_{\text{пл}}^k - T_{\text{хл}}^k \right)^2}{C_a \cdot \rho_a \cdot \lambda_a \cdot \left(\epsilon_{\text{пл}}^a - T_{\text{хл}}^a \right)^2} \gg 1. \quad (1.20)$$

«Выражение (1.20) доказывает экспериментально установленные условия наибольшего переноса материала с анода на катод». [35]

$$\lambda_a \leq (5...6) \cdot \lambda_k; T_{\text{пл}}^a \leq (3...4) \cdot T_{\text{пл}}^k. \quad (1.21)$$

Основным преимуществом обобщенной модели процесса электроискрового легирования является возможность управления свойствами формируемого покрытия, изменения структурных и физико-химических характеристик электродных материалов. [35]

Использование режущего инструмента с покрытием, в котором слой покрытия, включающий единственный слой одного вещества или несколько слоев двух или более веществ, например, карбида, нитрида, карбонитрида, карбоксида и карбоксинитрида титана, а также оксида алюминия, с общей толщиной пленки от 3 до 20 мкм, образован на поверхности подложки, выполненной из цементированного карбида, путем химического осаждения из газовой фазы, для резания стали, чугуна и т.п.

Когда пленка покрытия образована на поверхности цементированного карбида на основе карбида вольфрама, в пленке покрытия остается растягивающее напряжение, и покрытые таким образом режущие инструменты, как правило, считают имеющими уменьшенную прочность на разрыв и склонными к разрушению. Было предложено снимать остаточное растягивающее напряжение путем формирования трещин с помощью, например, упрочняющей дробеструйной обработки после образования пленки покрытия, и это предложение было довольно эффективным

Кроме того, известен режущий инструмент, который имеет трещины с высокой плотностью в пленке покрытия в нижней части на стороне подложки и имеет трещины с низкой плотностью в пленке покрытия в верхней части на стороне поверхности.

В процессе резания в последние годы становятся заметнее большие скорости, более высокие подачи и большая глубина резания, и срок службы инструмента имеет тенденцию уменьшаться больше, чем обычно. На этом фоне, когда трещины просто увеличиваются в пленке покрытия, устойчивость инструмента к разрушению улучшается. Однако данный инструмент имеет проблему уменьшения устойчивости к отделению, устойчивости к скалыванию и износостойкости пленки покрытия от трещин.

Такой инструмент имеет улучшенную износостойкость в верхней части, в то время как он имеет проблему недостаточной износостойкости в нижней части. В добавок к этому, он имеет дополнительную проблему возможного отделения пленки покрытия от трещин высокой плотности в нижней части. Это было выполнено для решения этих проблем, и исследования является предложить режущий инструмент с покрытием, который имеет превосходную устойчивость к скалыванию, износостойкость и устойчивость к разрушению, а также имеет длительный срок службы инструмента за счет улучшения режима формирования трещин в режущем инструменте с покрытием.

Основываясь на вышеописанной перспективе, автор [35] провел интенсивное исследование в области увеличения срока службы режущих инструментов с покрытием и обнаружил, что с описанной ниже конфигурацией можно улучшить устойчивость к разрушению без ухудшения устойчивости к скалыванию и износостойкости и в результате можно продлить срок службы инструмента. Таким образом, суть исследования заключается в следующем.

1) Режущий инструмент с покрытием включает в себя: подложку и слой покрытия, образованный на поверхности этой подложки, причем слой покрытия включает в себя по меньшей мере один слой соединения Ti , слой соединения Ti является соединением, содержащим элемент Ti и по меньшей мере один элемент, выбираемый из группы, состоящей из C , N , O и B , слой соединения Ti имеет окруженную трещинами область, если от верхней поверхности рассматривается полированная поверхность в слое соединения Ti , приблизительно параллельная поверхности подложки, при этом внутри эта область имеет прерывистую трещину, один конец или оба конца которой не контактируют с трещинами, составляющими эту область, и соотношение между среднечисленной плотностью A этой области и среднечисленной плотностью B прерывистой трещины удовлетворяет условию $0,7 < B/A < 2$.

2) Режущий инструмент с покрытием в соответствии (1), в котором слой соединения Ti образован на поверхности подложки и имеет среднюю толщину слоя от 2 до 20 мкм.

3) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1) или (2), в котором слой покрытия имеет слой оксида алюминия со средней толщиной слоя от 1 до 15 мкм на поверхности слоя соединения Ti.

4) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1)-(3), в котором слой соединения Ti является соединением, дополнительно содержащим по меньшей мере один элемент, выбираемый из группы, состоящей из Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Al и Si.

5) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1)-(4), в котором слой оксида алюминия является соединением, дополнительно содержащим по меньшей мере один элемент, выбираемый из группы, состоящей из Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W и Si.

6) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1)-(5), в котором слой покрытия включает в себя самый внешний слой, выполненный из по меньшей мере одного элемента, выбираемого из группы, состоящей из Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W и Si, и по меньшей мере одного элемента, выбираемого из группы, состоящей из C, N, O и B, на поверхности слоя оксида алюминия.

7) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1)-(6), в котором весь слой покрытия имеет общую толщину слоя от 3 до 30 мкм в качестве средней толщины слоя.

8) Режущий инструмент с покрытием в соответствии с любым из (1)-(7), в котором подложка является любой из цементированного карбида, кермета, керамики или спеченного кубического нитрида бора.

Режущий инструмент с покрытием по [35] включает в себя подложку и слой покрытия, образованный на поверхности этой подложки. В частности, примеры типов режущего инструмента с покрытием могут включать в себя

индексируемые режущие вставки для фрез или токарных резцов, сверл, а также торцевых фрез.

Примеры подложки по [35] могут включать в себя, например, цементированный карбид, кермет, керамику, спеченный кубический нитрид бора, спеченный алмаз и быстрорежущую сталь. Среди них более предпочтительной для превосходной износостойкости и устойчивости к разрушению является подложка из цементированного карбида, кермета, керамики или спеченного кубического нитрида бора.

Такая подложка может иметь модифицированную поверхность. Эффекты исследования проявляются даже когда поверхность модифицируется таким образом, что, например, на поверхности для цементированного карбида формируется бесподложечный слой, а для кермета может быть сформирован упрочняющий поверхность слой.

Весь слой покрытия по [35] имеет общую толщину слоя предпочтительно от 3 до 30 мкм в качестве средней толщины слоя. Износостойкость может быть плохой при толщине меньше чем 3 мкм, а адгезия к подложке и устойчивость к разрушению может уменьшаться при толщине больше чем 30 мкм. Диапазон от 3 до 20 мкм является даже более предпочтительным.

Слой покрытия по [35] включает в себя по меньшей мере один слой соединения Ti. Слой соединения Ti означает слой соединения, содержащего элемент Ti в качестве основного компонента и дополнительно содержащего по меньшей мере один элемент, выбираемый из группы, состоящей из C, N, O и B. Слой соединения Ti может содержать по меньшей мере один элемент, выбираемый из группы, состоящей из Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Al и Si в качестве дополнительного компонента.

Слой соединения Ti по [35] предпочтительно формируется на поверхности подложки, потому что адгезия между подложкой и слоем покрытия улучшена. Слой соединения Ti по [35] имеет среднюю толщину слоя предпочтительно от 2 до 20 мкм. Причина этого заключается в том, что

износостойкость имеет тенденцию к уменьшению, когда слой соединения Ті имеет среднюю толщину слоя меньше чем 2 мкм, в то время как устойчивость к разрушению имеет тенденцию к уменьшению, когда слой соединения Ті имеет среднюю толщину слоя больше чем 20 мкм.

В слое соединения Ті по [35], если от верхней поверхности рассматривают полированную поверхность, приблизительно параллельную поверхности подложки, слой соединения Ті имеет окруженную трещинами область, и внутри эта область имеет прерывистую трещину, один конец или оба конца которой не контактируют с трещинами, составляющими эту область. Здесь фраза «рассматривают от верхней поверхности» означает вид на полированную поверхность в приблизительно нормальном к этой поверхности направлении. Другими словами, это означает вид со стороны передней поверхности слоя покрытия, хотя она и не существует из-за полировки, то есть вид с противоположной стороны от подложки. В дополнение к этому соотношение между среднечисленной плотностью А этой области и среднечисленной плотностью В прерывистой трещины удовлетворяет соотношению $0,7 < B/A < 2$, с получением тем самым эффекта остановки трещин, образующихся в слое покрытия во время резания, прерывистой трещиной, так что устойчивость к скалыванию и устойчивость к разрушению являются превосходными. В дополнение к этому выпадение частиц из слоя покрытия во время резания подавляется до минимума наличием прерывистой трещины, и таким образом можно поддерживать износостойкость. Когда соотношение В/А между среднечисленной плотностью А области и среднечисленной плотностью В прерывистой трещины составляет 0,7 или меньше, распределение прерывистой трещины является недостаточным, и таким образом невозможно получить эффект остановки развития трещин, образующихся в слое покрытия во время резания, прерывистой трещиной, так что устойчивость к скалыванию и устойчивость к разрушению уменьшаются. С другой стороны, когда соотношение В/А между среднечисленной плотностью А области и

среднечисленной плотностью V прерывистой трещины составляет 2 или больше, прерывистая трещина распределяется по многим местам, так что трещины, составляющие упомянутую область, и прерывистая трещина легко связываются, и устойчивость к разрушению уменьшается.

Полированная поверхность слоя соединения T_i является поверхностью слоя соединения T_i , которая получается путем полировки режущего инструмента с покрытием приблизительно параллельно поверхности подложки до тех пор, пока не откроется слой соединения T_i . В этой точке предпочтительно получать полированную поверхность в положении толщины слоя 50% или больше от средней толщины слоя соединения T_i . Для режущего инструмента с покрытием, сформированным слоями соединения T_i с множеством составов, предпочтительно измерять область слоя состава с самой толстой средней толщиной слоя и прерывистой трещиной.

Область, наблюдаемая на полированной поверхности слоя соединения T_i по [35], является областью, окруженной трещинами, образованными в слое покрытия во время охлаждения после формирования слоя покрытия, а трещины получены в слое покрытия путем обработки, такой как сухая струйная обработка и упрочняющая дробеструйная обработка. Число областей определяется таким образом, что наименьшая окруженная трещинами область является одной областью. Когда есть даже меньшая область в области, они определяются как две области.

Среднечисленную плотность области по [35] можно получить следующим способом. Измеряется число областей, наблюдаемых на полированной поверхности слоя соединения T_i . Числовую плотность областей можно получить путем деления числа областей на площадь измеряемого слоя соединения T_i . Среднечисленную плотность можно получить путем деления числовой плотности на число измеряемых областей наблюдения.

Прерывистая трещина по [35] является трещиной, у которой один конец или оба конца трещины не контактируют с трещинами,

составляющими упомянутую область. Примеры состояния прерывистой трещины могут включать в себя, например, состояние, в котором отсутствует контакт с любой трещиной в упомянутой области, и состояние развития трещин из трещин, составляющих упомянутую область, в направлении к внутренней части области, в то время как это развитие останавливается, не пересекая область.

Среднечисленную плотность прерывистой трещины по [35] можно получить следующим способом. Измеряется число сегментов прерывистой трещины, наблюдаемых на полированной поверхности слоя соединения Ti. Числовую плотность прерывистой трещины можно получить путем деления числа сегментов прерывистой трещины на площадь измеряемого слоя соединения Ti. Среднечисленную плотность можно получить путем суммирования каждой числовой плотности измеряемых областей наблюдения и деления суммы числовых плотностей на число измеряемых областей наблюдения.

Слой покрытия по [35] предпочтительно включает в себя слой оксида алюминия (здесь далее слой Al_2O_3) на поверхности слоя соединения Ti, потому что возможно подавить прогресс износа благодаря реакции с материалом обрабатываемой детали. Кристаллическая система слоя Al_2O_3 не ограничивается особым образом, и ее примеры могут включать α -форму, β -форму, δ -форму, γ -форму, κ -форму, χ -форму, псевдо- τ -форму, η -форму, и ρ -форму. Среди них кристаллическая система слоя Al_2O_3 предпочтительно является α -формой, которая устойчива при высоких температурах, или κ -формой, которая имеет превосходную адгезию между слоем соединения Ti и слоем Al_2O_3 . В частности, в случае, когда область, вовлекаемая в процесс резания, становится очень горячей при такой температуре, как при высокоскоростном резании, слой Al_2O_3 не так легко разрушается или скалывается при использовании слоя α - Al_2O_3 . Слой Al_2O_3 предпочтительно имеет среднюю толщину слоя от 1 до 15 мкм. Устойчивость к износу в виде лунки на передней поверхности режущего инструмента может быть

уменьшена, когда слой Al_2O_3 имеет среднюю толщину слоя меньше чем 1 мкм, а когда средняя толщина слоя составляет более 15 мкм, легко происходит отделение, и может уменьшиться устойчивость к разрушению.

2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЭИЛ

Дискретный характер временных разверток и эрозионных следов спектрограмм, наблюдаемых в большом диапазоне длительностей и амплитуд импульсных разрядов, дал основу разработке И.А. Бакуто и И.Г. Некрашевичем миграционной теории электрической эрозии металлов [36, 37, 38]. Соответствуя данной теории весь ток разряда в каждый временной момент идет не сквозь всю зону электрода, а только через малую её часть. Этот процесс осуществляется через разрядные тонкие каналы. В связи с довольно малым диаметром канала (1-10 мкм) в контактной точке канала с электродом идёт ток с большой плотностью, что вызывает взрыв и нагрев материала электрода, причём в зависимости от условий главную роль в нагреве электрода может играть как плоский источник тепла, так и объёмный источник. После взрыва разрядный канал движется на другое место. Эрозия на аноде и катоде может проходить не одновременно, так как нужное время нагрева контактной зоны на электродах может быть разным. Оно зависит от свойств электродных материалов. Тем не менее даже при одних и тех же материалах электродов этот эффект может проявиться из-за различного характера электродно-ионных процессов на катоде и аноде. Следовательно, тепловые процессы имеют чрезвычайно важное значение в процессе массопереноса при электроискровом легировании. [36, 37, 38]

В [39] описывается, что глубина диффузии из металлографических исследований может быть в пределах 10...60 мкм. При электроискровом легировании твёрдым сплавом Т5К10 стальной заготовки в диффузионном слое были выявлены нитриды железа, а также вольфрам и кобальт. Значение диффузионных процессов в твёрдых телах при стационарных изометрических условиях растёт с повышением температуры. Тем не менее, опыты, проведённые профессором Л.Н. Лариковым [39, 40], выявили, что под воздействием механической нагрузки, лазерного излучения,

магнитоимпульсного воздействия, и других влияний растет подвижность атомов, которая приводит к значимому ускорению массопереноса при низких температурах, даже при комнатных. Чтобы объяснить это явление рассматриваются физические теории о механизме перемещения атомов в кристаллической решетке сплавов и металлов, межузельный механизм диффузии, в соответствии с которым главное значение в массопереносе принадлежит межузельным атомам, которые возникают в процессе перемещения винтовых дислокаций.

Процесс нанесения покрытий на металлорежущий инструмент методом электроискрового легирования должен выдерживать два необходимых условия взаимодействия между поверхностными слоями основного материала и упрочняющим материалом:

- на границе раздела данных поверхностей должны иметь место конвективные и диффузионные процессы, обеспечивающие прочное соединение покрытия и основы;

- выделяющая при ЭИЛ теплота, должна оказывать небольшое воздействие на состояние структуры поверхности заготовки.

Двум этим условиям соответствует технология, осуществляющая нагрев поверхности заготовки до температуры плавления упрочняемого материала.

$$\Theta(x, z)|_{y=0} = T_{пл}$$

Такая технология будет обеспечивать необходимое качество поверхности упрочнения и сохранит физико-механические свойства поверхностных слоев материала основы.

2.1 Математическое моделирование процесса упрочнения режущего инструмента методом ЭИЛ

Сущность процесса теплообмена при ЭИЛ можно представить таким образом [41, 42]: твердосплавный электрод, как показано на рисунке 2.1, имея положительный заряд, со скоростью V скользит по поверхности упрочнения. В месте контакта между упрочняемым изделием, имеющим отрицательный заряд и электродом с положительным зарядом возникают электрические разряды, связанные с коротким замыканием, которые нагревают изделие и электрод.

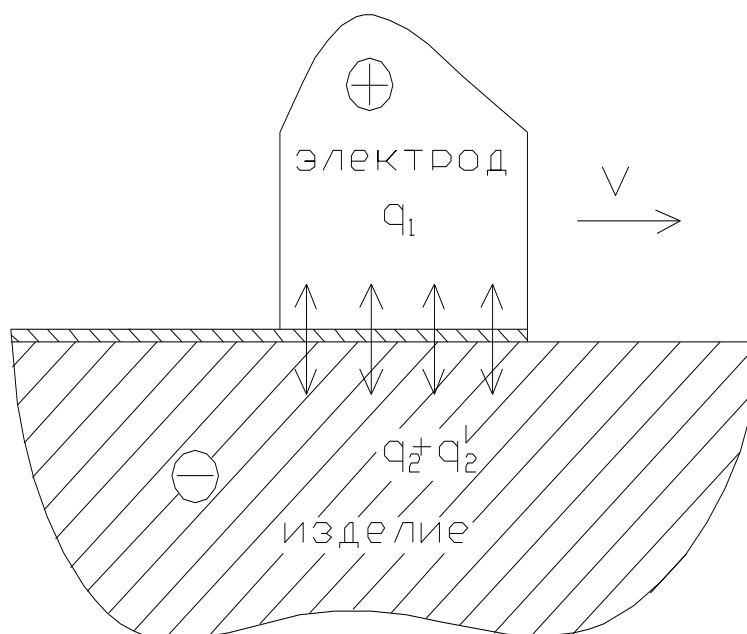


Рис. 2.1. Модель процесса электроискрового нанесения покрытий

Из условия теплового баланса обозначим интенсивность потока тепла в электрод q_1 , а интенсивность потока тепла в изделие - q_2 .

Электродный материал, который переносится на заготовку, является еще одним источником нагрева заготовки q_3 .

Представим математическую модель процесса ЭИЛ в следующем виде: в изделии распространение тепла описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

где τ - текущее время; θ – текущая температура точки; ω – коэффициент температуропроводности; x, y, z – координаты точек.

Условия однозначности:

1) коэффициент температуропроводности ω зависит от температуры анализируемой точки. Для приведения поставленной задачи к стационарной величина ω нами была принята постоянной, так как в первую очередь нас интересует температура поверхности близкая к температуре плавления. При небольшом разбросе значений изучаемой температуры примем физические характеристики материала неизменными. Это даст возможность существенного упрощения решения поставленной задачи.

Область применения:

задача рассматривает установления температуры на поверхности тела неограниченных размеров. Это значит, что для такого случая:

- 1) координата x варьируется от $-\infty$ до $+\infty$, $x \in (-\infty, +\infty)$;
- 2) координата y варьируется от 0 до $+\infty$, $y \in (0, +\infty)$;
- 3) координата z варьируется от $-\infty$ до $+\infty$, $z \in (-\infty, +\infty)$.

Начальные условия: температура θ в начальный момент времени равна температуре окружающей среды и условно принимаем её

$$\theta = 0.$$

Граничные условия: на упрочняемой поверхности в реальном процессе можно установить 2 граничных условия. Первое условие связано с перемещением по верхней границы упрочняемого тела теплового источника q_0 . Нагрев этого тела реализуется от 2 тепловых источников. Источник 1 – это количество тепла, идущее от электроискровых разрядов внутрь упрочняемой детали q_2 , а ещё один источник теплоты q_3 реализуется теплотой, перенесенной перешедшим материалом электрода. Это является

граничным условием второго рода, которое можно описывать выражением (2.2).

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_2 + q_3, \text{ где температура верхней границы } \theta = T_{i\bar{e}}. \quad (2.2)$$

$$q_2 = \frac{W}{S_{\dot{y}}} \cdot K_2, \quad (2.3)$$

$$q_3 = L_{f\dot{\Theta}} \cdot m_{\dot{\Theta}}, \quad (2.4)$$

$$K_2 = 1 - \frac{2}{p+1}, \quad (2.5)$$

$$p = \sqrt{\frac{\lambda_{\dot{\Theta}} \cdot C_{\dot{\Theta}} \cdot \rho_{\dot{\Theta}}}{\lambda \cdot C \cdot \rho}}. \quad (2.6)$$

Здесь $S_{\dot{\Theta}}$ – площадь сечения электрода; W – мощность генератора; $m_{\dot{\Theta}}$ – масса перенесённого материала электрода в единицу времени; $L_{f\dot{\Theta}}$ – скрытая теплота плавления материала электрода; $\lambda_{\dot{\Theta}}$, $C_{\dot{\Theta}}$, $\rho_{\dot{\Theta}}$, λ , C , ρ – коэффициенты теплопроводности, теплоёмкости и плотности электрода и изделия соответственно.

Введем еще одно граничное условие (граничное условие первого рода) на упрочняемой поверхности тела.

$$\theta(x, y, z, \tau) = 0, \text{ при } \tau = 0.$$

Следовательно, граничные условия дают возможность привести тело ограниченных размеров к неограниченному.

Решение уравнения (2.1) будем вести «методом источников», который разработал академик Рыкалин Н.Н. [44] Применительно к процессам обработки металлов этот метод впоследствии применил профессор Резников А.Н. [45].

Методом источников можно решать задачи о распределении теплоты между взаимодействующими телами, которые соприкасаются. В итоге получаются результаты, которые удовлетворяют инженерным подходам при анализе процессов обработки металлов резанием.

В соответствии с классификацией тепловых источников, предложенной А.Н. Резниковым [11], формулировка нашей задачи может быть следующей: для нахождения значения температуры в какой-то точке, имеющей координаты x, y, z бесконечно большого твёрдого тела, в котором движется точечный источник теплоты с мощностью Q , при установившемся теплообмене.

«Тепловой источник считается движущимся, если критерий Пекле, равный $Pe = \frac{v \cdot l}{\omega}$, меньше 8». [11]

В рассматриваемом случае $Pe \leq 6$.

Эта ситуация может описываться выражением для мгновенного теплового источника [11]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v(x_u - x) + vR}{2\omega}\right]. \quad (2.7)$$

где λ - коэффициент теплопроводности; ω - коэффициент температуропроводности; v - скорость перемещения источника; $R = \sqrt{(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}$; x_u, y_u, z_u - координаты теплового источника.

Проведем преобразование формулы (2.7):

$$\theta(x, z) = \frac{Q}{2\pi\lambda \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \exp\left[-\frac{v(x_u - x) + \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right]. \quad (2.8)$$

Представим точечный источник плоским равномерно распределенным по круглому пятну с диаметром d , у которого плотность выделения теплоты равна:

$$q(x_u, z_u) = q_0, \text{ Вт/см}^2. \quad (2.9)$$

Выражение (2.8) с учётом (2.9) проинтегрируем по площади пятна нагрева:

$$\theta(x, z) = \frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^{d/2} dx_u \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \cdot \exp\left[-\frac{v(x_u - x) + \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right] \quad (2.10)$$

Разберём интеграл

$$\begin{aligned}
I_1 &= \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u-x)^2 + (z_u-z)^2}} \exp \left[-\frac{\nu(x_u-x) + \sqrt{(x_u-x)^2 + (z_u-z)^2}}{2\omega} \right] = \\
&= \exp \left[-\frac{\nu(x_u-x)}{2\omega} \right] \cdot \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u-x)^2 + (z_u-z)^2}} \exp \left[-\frac{\nu\sqrt{(x_u-x)^2 + (z_u-z)^2}}{2\omega} \right] = \\
&= \exp \left[-\frac{\nu(x_u-x)}{2\omega} \right] \cdot I_2
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Выполнив замену переменных $z_u - z = u$; $dz_u = du$; $x_u - x = a$ и $-\frac{\nu}{2\omega} = k$,

получим

$$I_2 = \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{du}{\sqrt{a^2 + u^2}} \cdot \exp \left[-k\sqrt{a^2 + u^2} \right]. \tag{2.12}$$

Чтобы решить интеграл I_2 воспользуемся ситуацией, что

$e^t = 1 + \frac{t}{1!} + \frac{t^2}{2!} + \dots + \frac{t^n}{n!} + \dots$, $t \in (-\infty, +\infty)$, то при $t = k\sqrt{a^2 + u^2}$:

$$\exp \left[-k\sqrt{a^2 + u^2} \right] = 1 + k\sqrt{a^2 + u^2} + \frac{1}{2}k^2(a^2 + u^2) + \frac{1}{6}k^3\sqrt{(a^2 + u^2)^3} + \dots + \frac{1}{n!}k^n\sqrt{(a^2 + u^2)^n} + \dots$$

$u \in (-\infty, +\infty)$. (2.13)

Функция под интегралом раскладывается в ряд

$$\frac{\exp \left[-k\sqrt{a^2 + u^2} \right]}{\sqrt{a^2 + u^2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + u^2}} + k + \frac{1}{2}k^2\sqrt{a^2 + u^2} + \frac{1}{6}k^3\sqrt{a^2 + u^2} + \dots + \frac{1}{n!}k^n\sqrt{(a^2 + u^2)^{n-1}} + \dots$$

$u \in (-\infty, +\infty)$. (2.14)

Проведем такое разложение

$$\begin{aligned}
\sqrt{a^2 + u^2} &= a\sqrt{1 + \frac{u^2}{a^2}} = a \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(-1)}{2} \cdot \frac{u^4}{a^4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(-1)}{2} \cdot \frac{(-3)}{2} \cdot \frac{u^6}{a^6} + \dots \right) = \\
&= a + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u^4}{a^3} + \frac{1}{16} \cdot \frac{u^6}{a^5} + \dots
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\sqrt{a^2 + u^2}} &= (a^2 + u^2)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a} \left(1 + \frac{u^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a} \left(1 + \frac{-1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^2} + \frac{-1}{2} \cdot \frac{(-3)}{2} \cdot \frac{u^4}{a^4} + \frac{-1}{2} \cdot \frac{(-3)}{2} \cdot \frac{(-5)}{2} \cdot \frac{u^6}{a^6} + \dots \right) = \\
&= \frac{1}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{u^4}{a^5} - \frac{5}{16} \cdot \frac{u^6}{a^7} + \dots
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Отсюда

$$\frac{\exp\left[\sqrt{a^2+u^2}\right]}{\sqrt{a^2+u^2}} = a - \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{u^4}{a^3} - \frac{5}{16} \cdot \frac{u^6}{a^7} + \dots + k + \frac{1}{2} k^2 \left(a + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u^4}{a^3} + \frac{1}{16} \cdot \frac{u^6}{a^5} + \dots \right) + \frac{1}{6} k^3 (a^2 + u^2) + \dots = u \left(a + k + \frac{1}{2} k^2 a + \frac{1}{6} k^3 a^2 \right) + u^2 \left(-\frac{1}{2a^3} + \frac{1}{4a} k^2 + \frac{1}{6} k^3 \right) + u^4 \left(\frac{3}{8a^3} - \frac{1}{16a^3} k^2 \right) + \dots \quad (2.17)$$

У полученного ряда оценим значимость составляющих. При $a = 2$, $u = 1$, $k = 0,7$ и $d = 2$ мм первый член ряда $u \left(a + k + \frac{1}{2} k^2 a + \frac{1}{6} k^3 a^2 \right) \approx 3,17$. Второй член полученного ряда $u^2 \left(-\frac{1}{2a^3} + \frac{1}{4a} k^2 + \frac{1}{6} k^3 \right) \approx 0,42$ меньше первого на порядок, в связи с этим в полученном решении функции под интегралом пренебрежём всеми, кроме первого членами ряда.

Отсюда, интеграл I_2 будет равен:

$$I_2 = \left(a + k + \frac{1}{2} k^2 a + \frac{1}{6} k^3 a^2 \right) u \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \exp \left[(x_u - x) \right] dx_u \quad (2.18)$$

Проведя подстановку пределов интегрирования, получим:

$$I_2 = \left(a + k + \frac{1}{2} k^2 a + \frac{1}{6} k^3 a^2 \right) \left[\sqrt{x_u(d-x_u)} \right] \exp \left[(x_u - x) \right] \quad (2.19)$$

Преобразуем выражение (2.10) к виду:

$$\theta(x, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \int_0^{d/2} \left((x_u - x) + k + \frac{1}{2} k^2 (x_u - x) + \frac{1}{6} k^3 (x_u - x) \right) \cdot 2\sqrt{x_u(d-x_u)} \exp \left[(x_u - x) \right] dx_u \quad (2.20)$$

Этот интеграл, к сожалению, нельзя взять в чистом виде, поэтому применим численное решение. Для этого выражение (2.20) представим следующим образом:

$$\theta(x, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} F(k), \text{ где} \quad (2.21)$$

$$F(k) = \int_0^{d/2} \left((x_u - x) + k + \frac{1}{2} k^2 (x_u - x) + \frac{1}{6} k^3 (x_u - x) \right) \cdot 2\sqrt{x_u(d-x_u)} \exp \left[(x_u - x) \right] dx_u \quad (2.22)$$

Для решения уравнения (2.22) численным методом примем, что $k=0\dots4$, $d=0\dots2,5$ мм. Воспользуемся пакетом MathCad для получения значений функции $F(k)$ в форме семейства кривых. При $a = 0,5$ матрица значений $F(k)$ равна:

$$z := \begin{pmatrix} 0.097 & 0.075 & 0.058 & 0.045 & 0.035 & 0.027 & 0.021 & 0.017 & 0.013 \\ 0.371 & 0.287 & 0.222 & 0.171 & 0.133 & 0.102 & 0.079 & 0.061 & 0.047 \\ 0.785 & 0.603 & 0.463 & 0.355 & 0.273 & 0.209 & 0.161 & 0.124 & 0.095 \\ 1.301 & 0.99 & 0.754 & 0.574 & 0.438 & 0.334 & 0.255 & 0.194 & 0.148 \\ 1.887 & 1.423 & 1.074 & 0.812 & 0.614 & 0.465 & 0.353 & 0.268 & 0.203 \\ 2.522 & 1.884 & 1.411 & 1.059 & 0.796 & 0.599 & 0.452 & 0.341 & 0.258 \\ 3.19 & 2.363 & 1.756 & 1.308 & 0.978 & 0.732 & 0.549 & 0.413 & 0.311 \\ 3.883 & 2.853 & 2.105 & 1.559 & 1.159 & 0.864 & 0.646 & 0.484 & 0.364 \\ 4.593 & 3.348 & 2.454 & 1.808 & 1.338 & 0.994 & 0.741 & 0.554 & 0.416 \\ 5.317 & 3.847 & 2.803 & 2.056 & 1.516 & 1.123 & 0.835 & 0.623 & 0.467 \\ 6.05 & 4.347 & 3.152 & 2.302 & 1.692 & 1.25 & 0.928 & 0.691 & 0.517 \end{pmatrix}$$

График функции $F(k)$ при $a = 0,5$, $d = 1$ и $k=0\dots4$ представлен на рисунке 2.2.

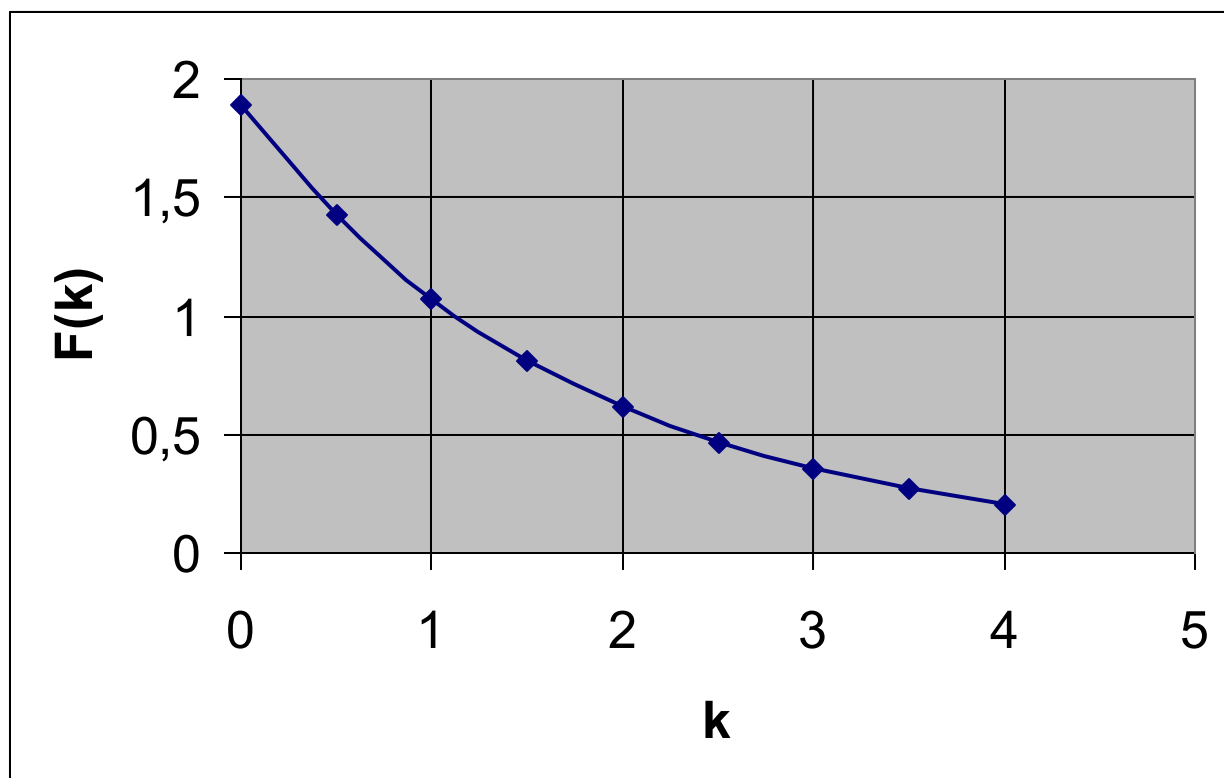


Рис. 2.2. График функции $F(k)$ при $d=1$, $k=0\dots4$ и $a=0,5$.

На рисунке 2.3 представлен график функции $F(k)$ при $d = 1,5$, $k = 0 \dots 4$ и $a = 0,5$.

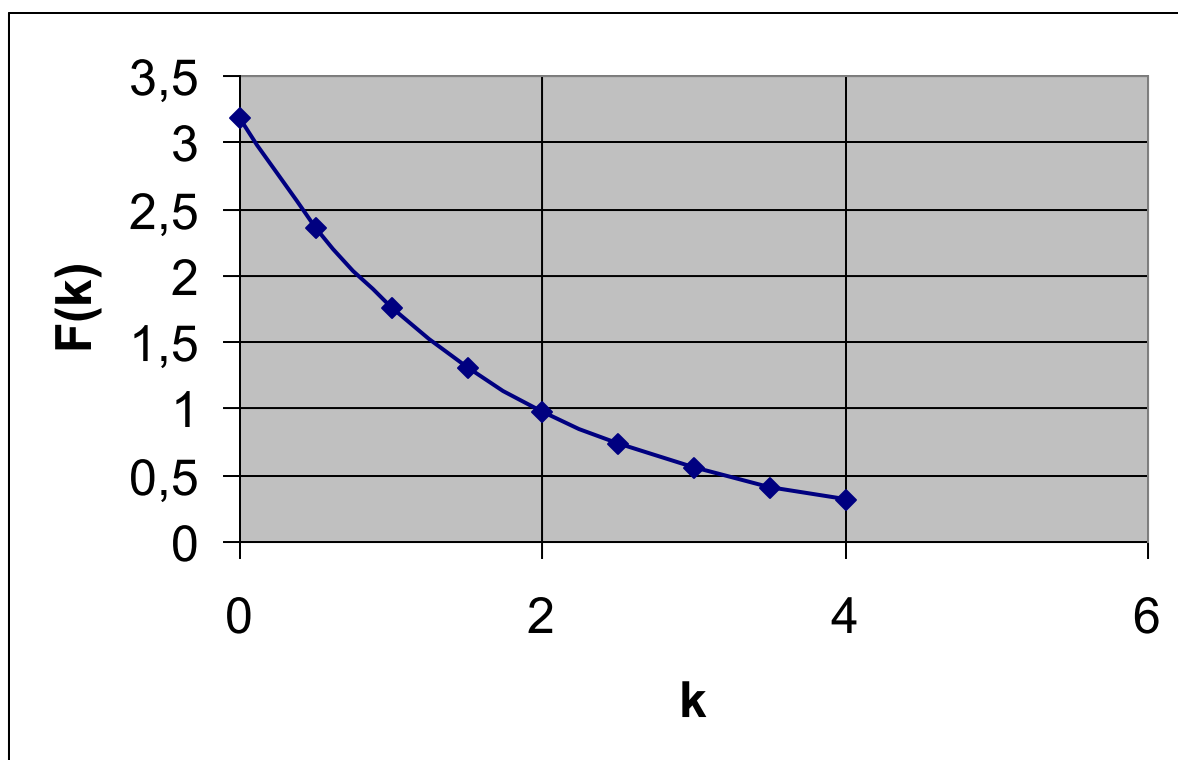


Рис. 2.3. График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0 \dots 4$ и $a=0,5$.

На рисунке 2.4 представлен график функции $F(k)$ при $d = 2$, $k = 0 \dots 4$ и $a = 0,5$.

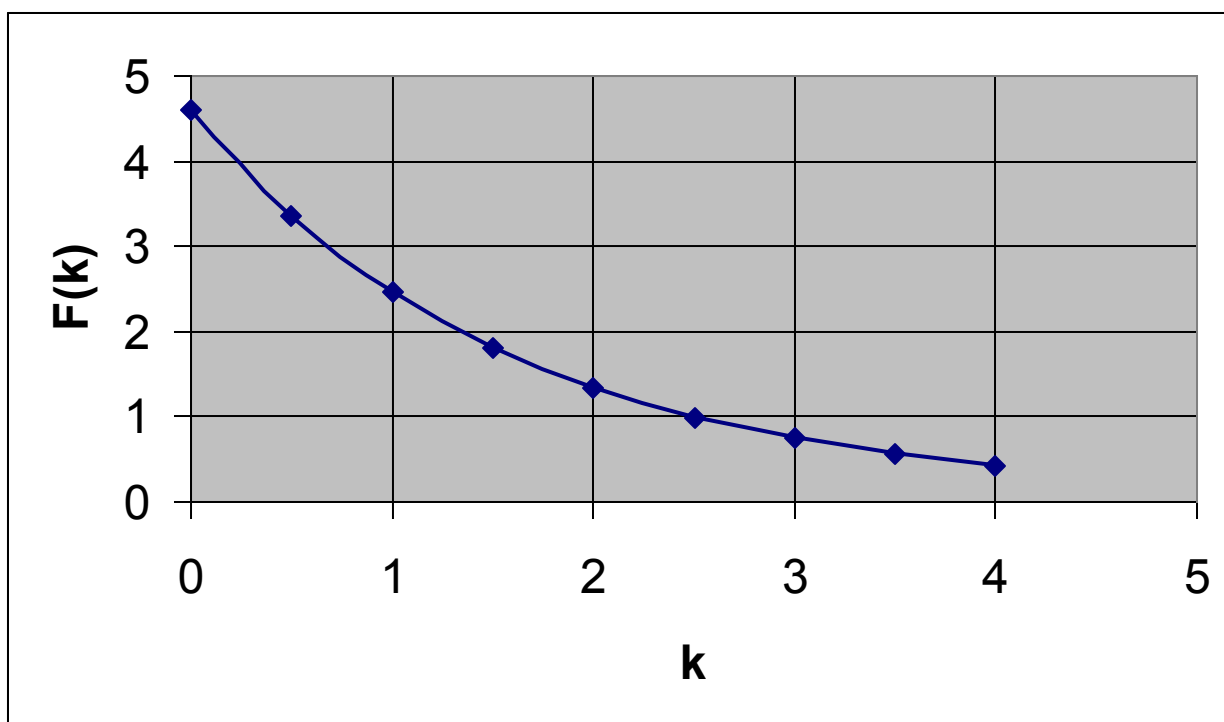


Рис. 2.4. График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0\dots4$ и $a = 0,5$.

На рисунке 2.5 представлена поверхность в виде семейства кривых, графически изображающее решение исходного уравнения во всем рассматриваемом диапазоне: $d = 0\dots2,5$, $k = 0\dots4$, $a = 0,5$.

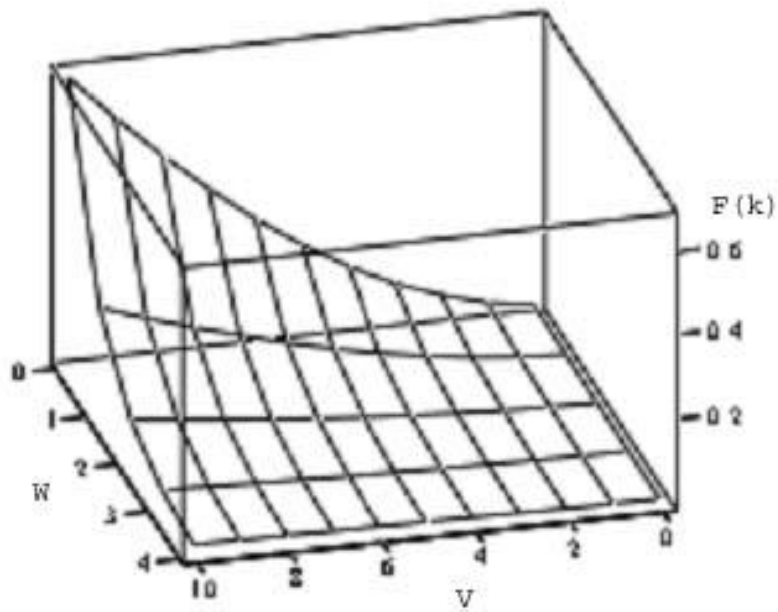


Рис. 2.5. График функции $F(k)$ при $a = 0,5$.

По оси абсцисс отложены относительные величины $d_i = \frac{i+1}{4}$, по оси ординат - $k_j = \frac{j}{2}$, $i \in (0,10)$, $j \in (0,10)$.

При $a = 1$ матрица значений $F(k)$ равна:

$$z := \begin{pmatrix} 0.024 & 0.015 & 8.97110^{-3} & 5.43610^{-3} & 3.29410^{-3} & 1.99610^{-3} \\ 0.097 & 0.058 & 0.035 & 0.021 & 0.013 & 7.78210^{-3} \\ 0.213 & 0.128 & 0.077 & 0.046 & 0.028 & 0.017 \\ 0.371 & 0.222 & 0.133 & 0.079 & 0.047 & 0.028 \\ 0.563 & 0.334 & 0.198 & 0.118 & 0.07 & 0.042 \\ 0.785 & 0.463 & 0.273 & 0.161 & 0.095 & 0.056 \\ 1.033 & 0.603 & 0.353 & 0.207 & 0.121 & 0.071 \\ 1.301 & 0.754 & 0.438 & 0.255 & 0.148 & 0.087 \\ 1.587 & 0.911 & 0.525 & 0.303 & 0.176 & 0.102 \\ 1.887 & 1.074 & 0.614 & 0.353 & 0.203 & 0.117 \\ 2.199 & 1.241 & 0.705 & 0.402 & 0.231 & 0.133 \end{pmatrix}$$

График функции $F(k)$ при $d = 1$, $k = 0 \dots 2,5$ и $a = 1$ представлен на рисунке 2.6.

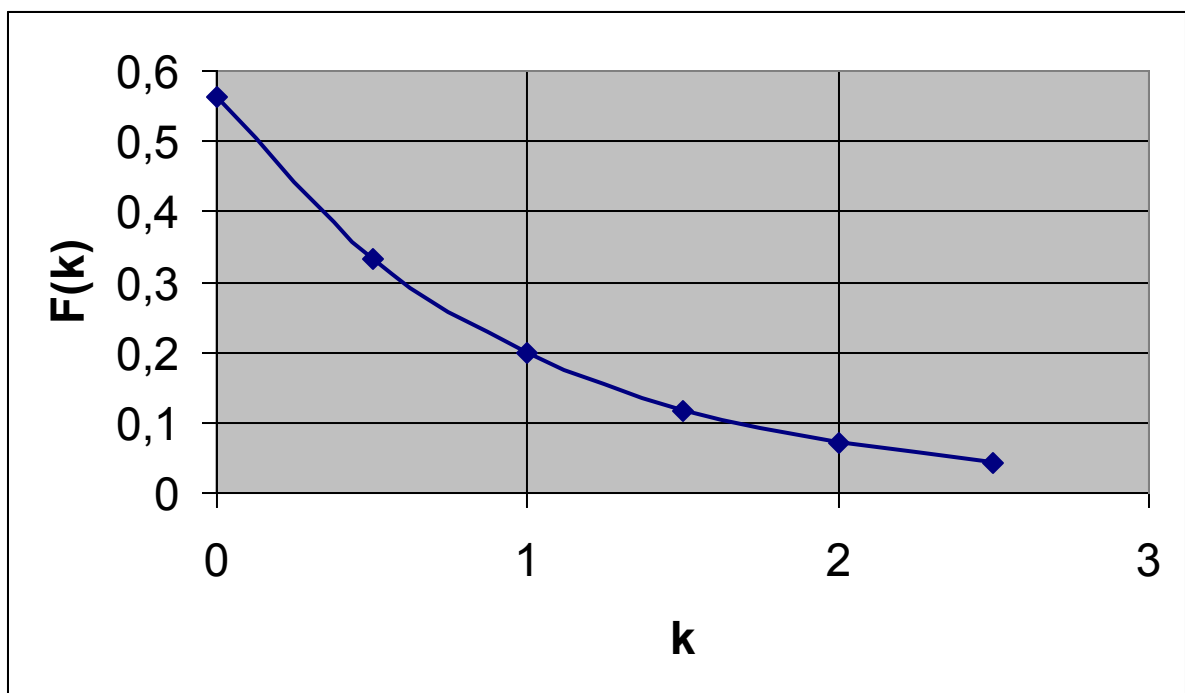


Рис. 2.6. График функции $F(k)$ при $d=1$, $k=0 \dots 2,5$ и $a = 1$.

На рисунке 2.7 представлен график функции $F(k)$ при $d = 1,5$, $k = 0 \dots 2,5$, $a = 1$.

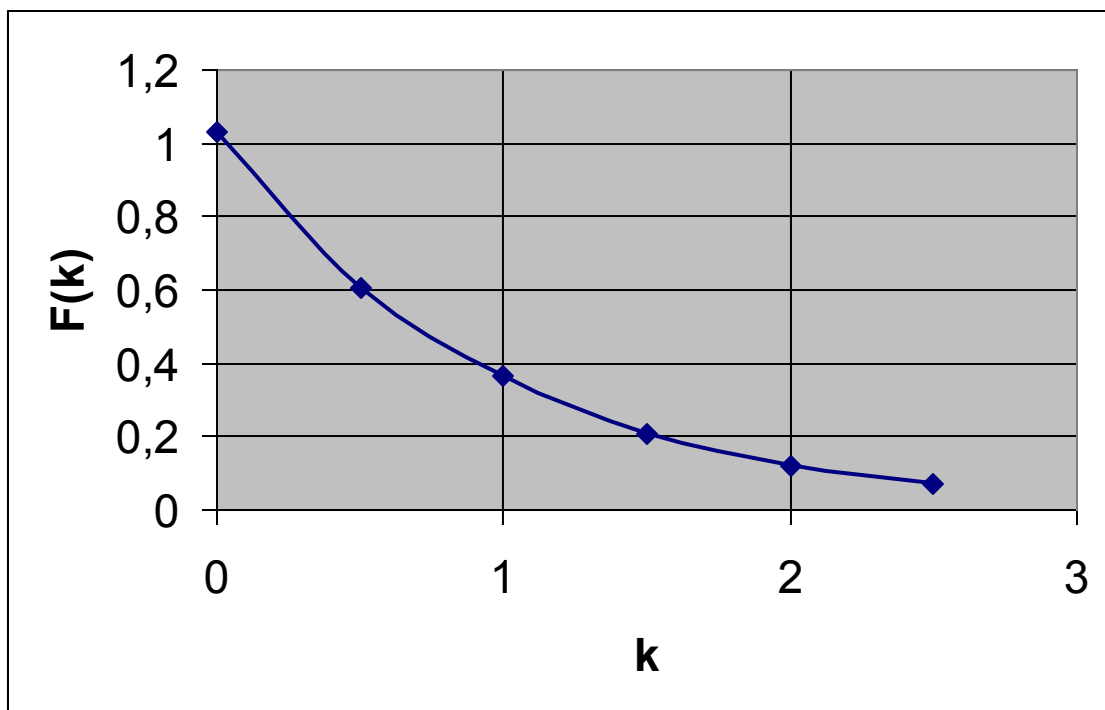


Рис. 2.7. График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0\dots2,5$ и $a = 1$.

На рисунке 2.8 представлен график функции $F(k)$ при $d = 2$, $k = 0\dots2,5$, $a = 1$.

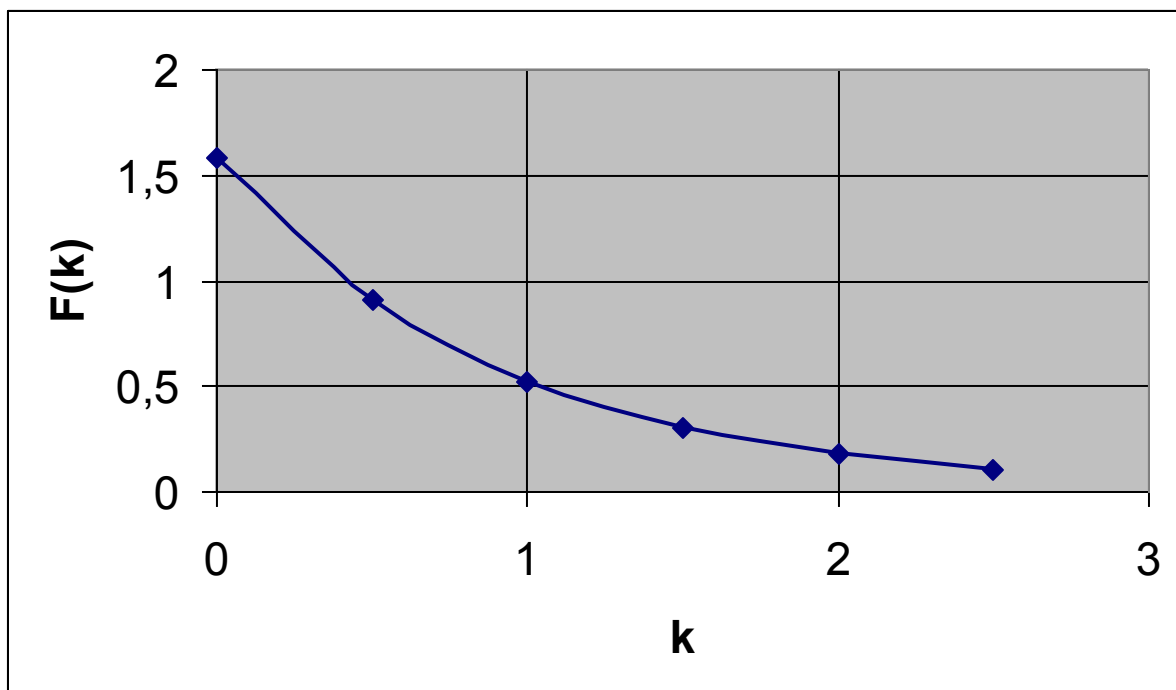


Рис. 2.8. График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0\dots2,5$ и $a = 1$.

На рисунке 2.9 представлена поверхность в виде семейства кривых, графически изображающее решение исходного уравнения во всем рассматриваемом диапазоне: $d = 0 \dots 2,5$, $k = 0 \dots 4$, $a = 1$.

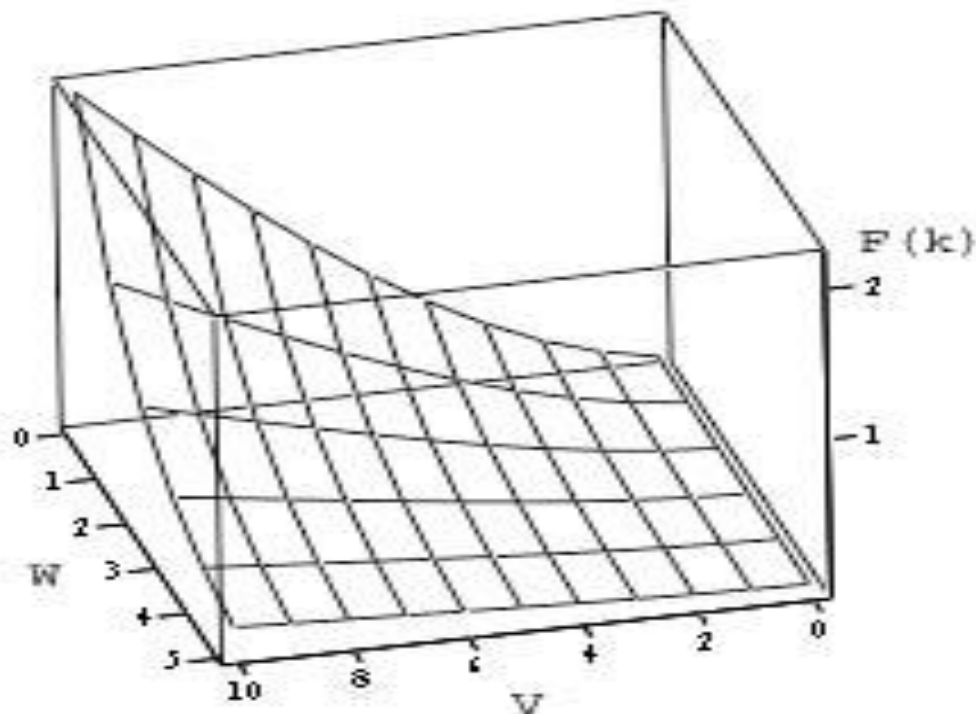


Рис. 2.9. График функции $F(k)$ при $a = 1$.

При $a = 2$ матрица значений $F(k)$ равна:

$$z := \begin{pmatrix} 6.12610^{-3} & 2.25210^{-3} & 8.28210^{-4} & 3.04510^{-4} & 1.1210^{-4} \\ 0.024 & 8.97110^{-3} & 3.29410^{-3} & 1.20910^{-3} & 4.4410^{-4} \\ 0.055 & 0.02 & 7.3410^{-3} & 2.68910^{-3} & 9.84910^{-4} \\ 0.097 & 0.035 & 0.013 & 4.70310^{-3} & 1.71710^{-3} \\ 0.15 & 0.054 & 0.02 & 7.210^{-3} & 2.61910^{-3} \\ 0.213 & 0.077 & 0.028 & 0.01 & 3.66510^{-3} \\ 0.287 & 0.103 & 0.037 & 0.013 & 4.8310^{-3} \\ 0.371 & 0.133 & 0.047 & 0.017 & 6.0910^{-3} \\ 0.463 & 0.164 & 0.058 & 0.021 & 7.42210^{-3} \\ 0.563 & 0.198 & 0.07 & 0.025 & 8.80510^{-3} \\ 0.671 & 0.235 & 0.082 & 0.029 & 0.01 \end{pmatrix}$$

На рисунке 2.10 представлен график функции $F(k)$ при $d = 1$, $k = 0 \dots 2$, $a = 2$.

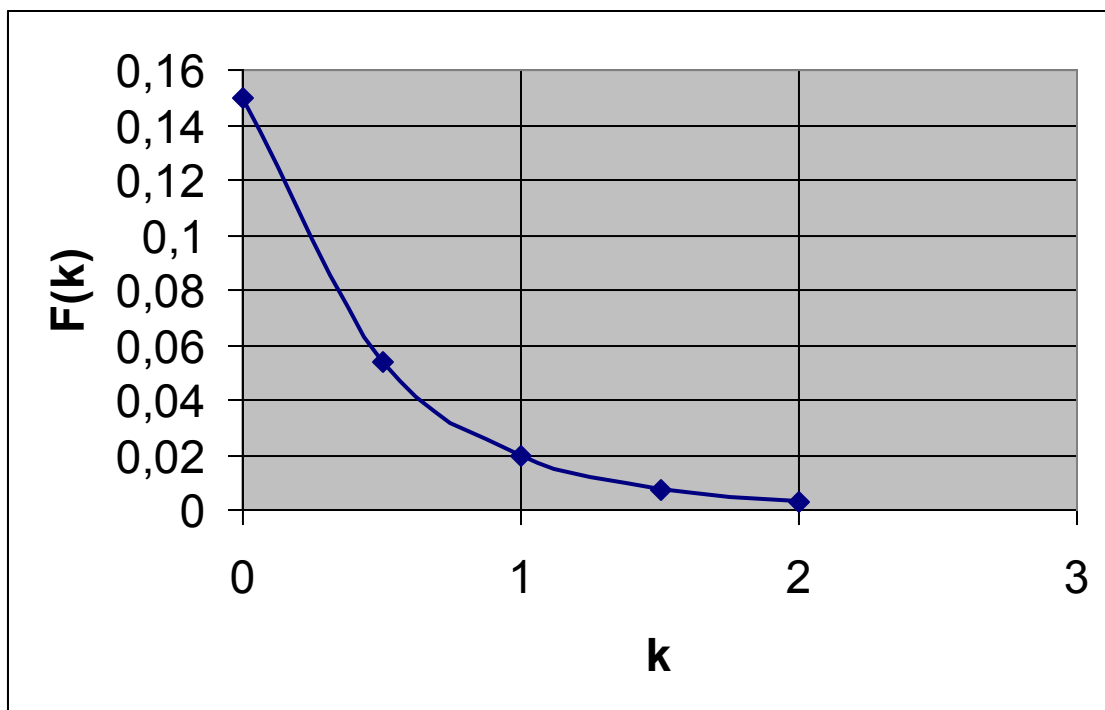


Рис. 2.10. График функции $F(k)$ при $d=1$, $k=0\dots2$ и $a=2$.

На рисунке 2.11 представлен график функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0\dots2$, $a=2$.

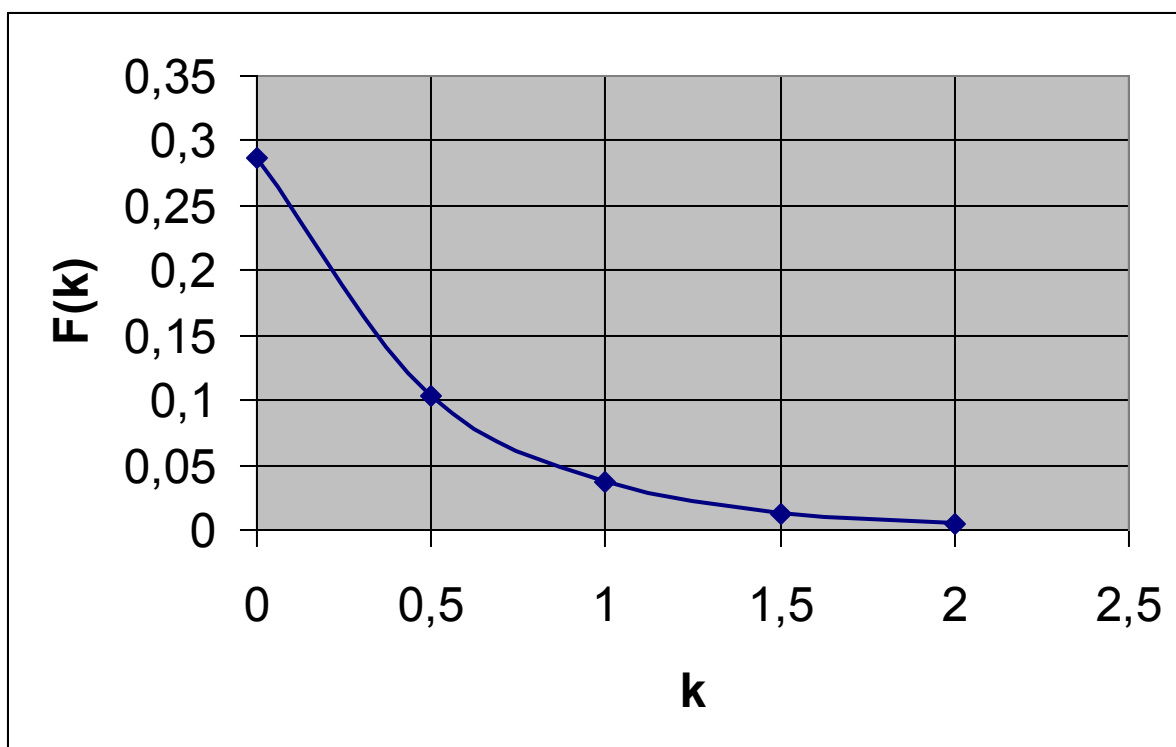


Рис. 2.11. График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0\dots2$ и $a=2$.

На рисунке 2.12 представлен график функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0\dots2$, $a=2$.

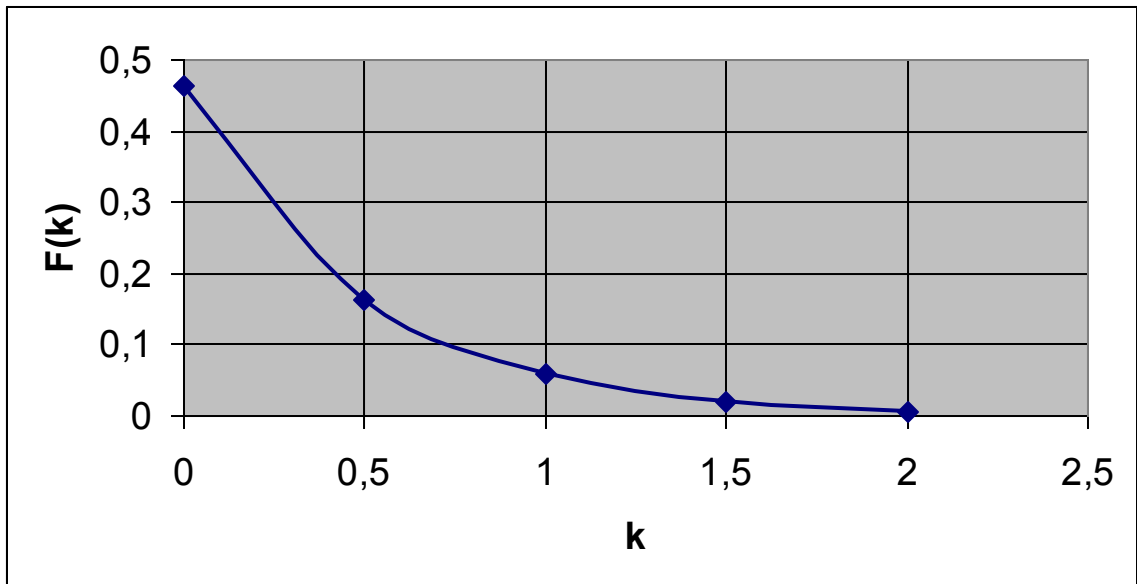


Рис. 2.12. График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0\dots 2$ и $a = 2$.

На рисунке 2.13 представлена поверхность в виде семейства кривых, графически изображающее решение исходного уравнения во всем рассматриваемом диапазоне: $d = 0\dots 2$, $k = 0\dots 4$, $a = 2$.

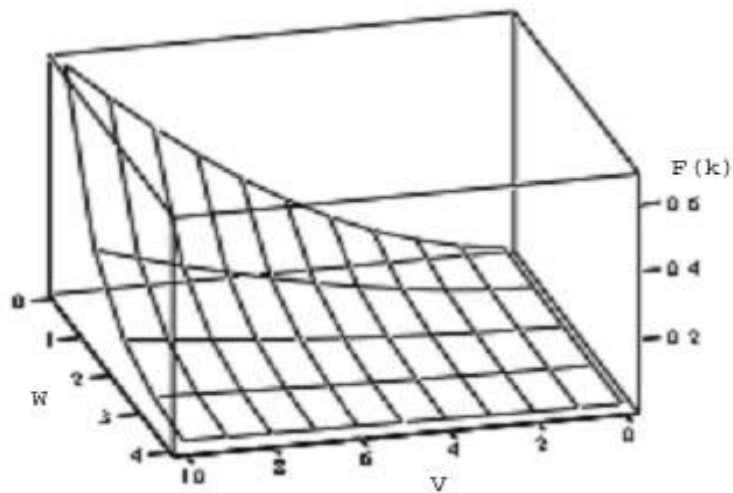


Рис. 2.13. График функции $F(k)$ при $a = 2$.

2.2 Оптимизация процесса нанесения покрытий методом электроискрового легирования

В реальных условиях процесс нанесения покрытий электроискровым методом регламентируется такими параметрами:

- 1) скоростью движения электрода v ;
- 2) мощностью генератора импульсов W ;
- 3) толщиной формируемого покрытия h .

Как представлено ранее, для получения покрытия с надежным сцеплением материала катода (изделия) с материалом анода (электрода) необходимо выполнить следующее условие: температура поверхности изделия должна была равна температуре плавления $\theta = T_{пл}$. Значит выражение (2.21) можно представить так:

$$T_{пл} = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \cdot F(k) \quad (2.23)$$

Неизвестными величинами в данном равенстве являются интенсивность теплового источника q_0 , и скорость его перемещения, которая является аргументом функции $F(k)$.

В выражении (2.1) определено, что нагрев материала основы ведется двумя тепловыми источниками, у которых общая мощность зависит от мощности генератора импульсов.

$$q_2 + q_3 = q_0 = \eta \cdot \frac{W}{S_3}, \quad (2.24)$$

где $\eta \approx 0,8$ – коэффициент полезного действия генератора импульсов;

W – мощность от разряда, которая определяется применяемым в данном случае типом генератора.

Равенство (2.23) является техническим ограничением «снизу». Оно является функцией равных температур, при которых должна обеспечиваться совокупность следующих параметров: скорость перемещения теплового источника v и мощность генератора импульсов W .

В нашем случае выражение ($v \rightarrow \max$) будет являться целевой функцией в нашей системе оптимизации.

Равенство (2.23), учитывая (2.24), можно представить следующим образом:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{э}} \cdot T_{\text{пл}}}{\eta \cdot F(k)}. \quad (2.25)$$

Чтобы определить третий параметр процесса – толщину формируемого покрытия примем следующее допущение: в установившемся процессе электроискрового нанесения покрытия полная энергия, которая поступает в анод, идёт на частичное его расплавление, а затем переносится на катод. Данное допущение возможно, так как в установившемся процессе анод (электрод) отдаёт теплоту катоду (основе) через свой материал, который переносится, а также тепло уходит в окружающую среду. С окружающей средой теплообмен ведётся через воздух, а воздух – плохой проводник тепла. Авторы [12, 13] считают, что в обычных условиях для наибольшего числа материалов величины привеса катода имеют максимальное значение, то есть толщина упрочнённого слоя катода ограничена. Эту ограниченность во многих ситуациях сдерживает практическое использование электроискрового нанесения покрытий. Таким образом, анализ обстоятельств, которые определяют характер ЭИЛ, и поиск возможностей управления этими факторами являются весьма актуальными задачами.

Ряд экспериментальных исследований эрозии анода (электрода) и переноса его материала на катод (изделие) позволяют делать вывод, что в электроискровом легировании в какой-то промежуток времени заканчивается не выброс материала анода и эрозия, а становится медленнее перемещение его на катод в силу испарения в окружающую среду. Это ограничение объясняется, учитывая полный комплекс механических и физико-химических процессов на поверхностях взаимодействующих электродов. В связи с тем, что электроискровое нанесение покрытий связано с множественными импульсными механическими и тепловыми воздействиями материалов

взаимодействующих электродов, структурными и фазовыми превращениями в поверхностных слоях, то возможно допустить, что данные процессы определяют ограничение и характер роста толщины формируемого слоя.

Структурные и фазовые превращения, охлаждение и нагрев поверхностей материалов электродов при воздействии электрических импульсов приводят к формированию остаточных напряжений I и II рода [48], которые характеризуют их конечное напряженное состояние. В реальных условиях электроискрового легирования весь перечень процессов, которые протекают между катодом и анодом определяет закон сохранения энергии. Следовательно, с малой погрешностью, которая связана с испарением материалов в окружающую среду, составляющей приблизительно 3...5%, можно сделать предположение, что интенсивность потока тепла равна:

$$q_3 = \eta \cdot p \cdot \frac{W}{S_3} = m_3 \cdot L_{f3} . \quad (2.26)$$

Это равенство, по сути, определяет интенсивность нанесения (расплавления) материала анода (электрода). Масса электрода, переносимого во временную единицу, можно вычислить произведением объёма на плотность:

$$m_3 = \rho_3 \cdot d \cdot h \cdot v . \quad (2.27)$$

Отсюда, равенство (2.26) можно записать в таком виде:

$$\eta \cdot p \cdot \frac{4W}{\pi \cdot d^2} = \rho \cdot h \cdot d \cdot v \cdot L_{f3} , \quad (2.28)$$

отсюда

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{f3} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot v . \quad (2.29)$$

Данное выражение связывает толщину формируемого покрытия, мощность применяемого генератора импульсов в конкретных условиях процесса со скоростью перемещения электрода (анода).

У покрытия толщина выбирается из практики, для разных условий эксплуатации и материалов нанесения и она может быть различной, при этом

надо учитывать такое обстоятельство: с увеличением толщины покрытия увеличивается его хрупкость. В связи с этим чаще всего толщину покрытия металлорежущего инструмента принимают от 8 до 12 мкм. Производственные испытания режущего инструмента с покрытием подтверждают это утверждение. Режущий инструмент с толщиной покрытия более 20 мкм, обыкновенно, изнашивался скалыванием.

Отсюда следует, что электроискровое нанесение покрытий может быть описано такой системой уравнений:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{э}} \cdot T_{\text{пл}}}{\eta \cdot F(k)}. \quad (2.30)$$

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{\text{фэ}} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot v. \quad (2.31)$$

$$W \leq W_{\text{max}}. \quad (2.32)$$

$$W \geq W_{\text{min}}. \quad (2.33)$$

Рассмотрим случай нанесения покрытия из твёрдого сплава СТИМ-3 ($\rho = 5,37 \text{ г/см}^3$, $\lambda = 0,21 \text{ Вт/(см} \cdot \text{°C)}$, $L_{\text{фэ}} = 1,45 \cdot 10^7 \text{ Вт/(г} \cdot \text{с)}$) на быстрорежущую сталь Р6М5 ($T_{\text{пл}} = 1550 \text{ °C}$) при таких условиях: $d = 2 \text{ мм}$, $a = 1$. В данных условиях $F(k)$ хорошо аппроксимируется следующей экспоненциальной зависимостью:

$$F(k) = \exp\left[-0,82 \frac{v}{2\omega}\right]. \quad (2.34)$$

Проведем допущение, что мощность установки W при нанесении варьируется в пределах 150...400 Вт.

Тогда с этим допущением решение уравнений (2.30-2.33) сведём в таблицу 2.1 и представим графиками функций (рис. 2.5).

Таблица 2.1 – Решение уравнений

Скорость v , см/с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Максимальная мощность генератора	400	400	400	400	400	400
Минимальная мощность генератора	150	150	150	150	150	150
Мощность по уравнению (2.31)	122	249	367	489	612	734
Мощность по уравнению (2.30)	121	182	275	413	622	944

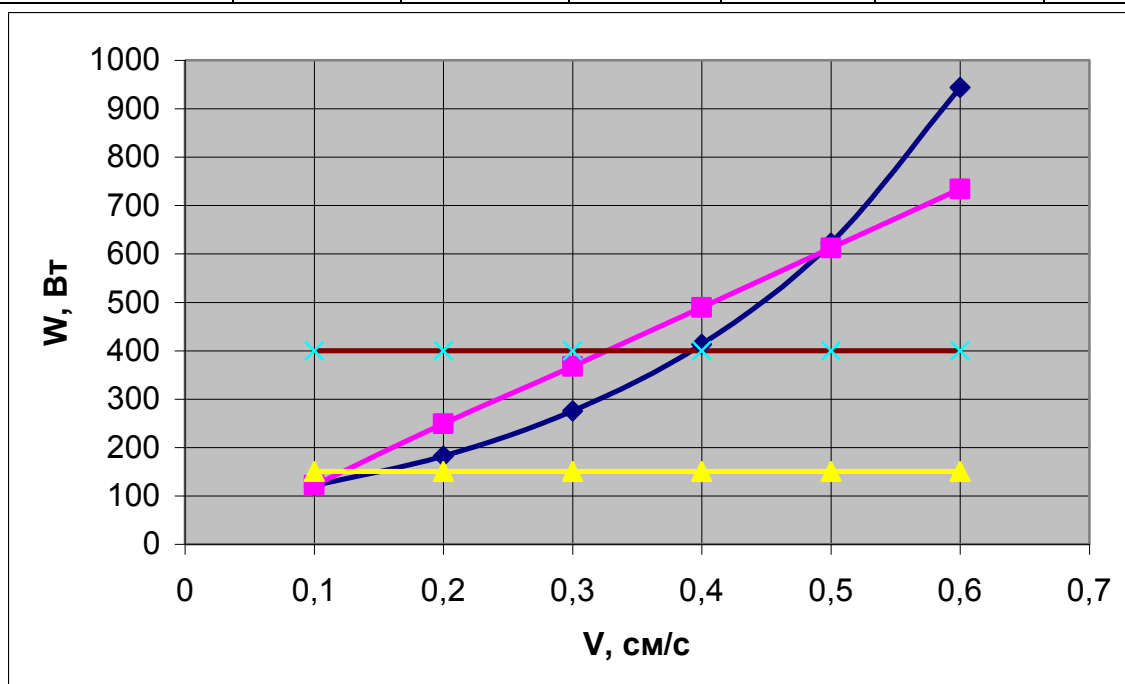


Рисунок 2.14. Оптимизация электроискрового нанесения покрытия из СТИМ-3 на быстрорежущую сталь Р6М5.

На рис. 2.14 представлен график зависимости по уравнению (2.30). Он представляет возможные значения мощности генератора импульсов

$W = F(V)$, при которой на поверхности обрабатываемой заготовки температура будет равна температуре плавления основы, таким образом, эта зависимость является нижним ограничением в нашей оптимизации.

График функции уравнения (2.31) представляет наибольшие значения мощности $W = F(V)$, при которой будет обеспечиваться заданная толщина покрытия. Эта функция будет являться верхним ограничением системы оптимизации.

Функции (2.32) и (2.33) так же будут являться ограничениями.

Следовательно, на рисунке 2.5 графиками функций (2.30-2.33) ограничена область искомых возможных решений. В данной области необходимо выбрать точку с максимальной производительностью процесса, а это соответствует v_{\max} . Таким образом выбираем $v \approx 0,39$ см/с.

Таким образом, при данных условиях нанесения техпроцесс должен производиться при следующих оптимальных параметрах:

$W = 400$ Вт, $v \approx 0,39$ см/с и $h = 12$ мкм.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

3.1 Металлографические исследования опытных образцов с нанесенным покрытием из твёрдых сплавов, не содержащих вольфрам

Исследования авторов [19-20] показывают, что чаще всего на поверхности образовывается упрочненный слой толщины 20...50 мкм, у которого твердость в 2...2,5 раза больше твердости основы при сплошности покрытия 60...90% (табл. 3.1).

Твёрдость образованного покрытия превышает твёрдость материала основы.

При нанесении покрытия из никеля и алюминия на титан получаемый слой имеет большую твёрдость по сравнению с обоими электродами. Это связано с образованием интерметаллидов материалов катода и анода, а также соединений титана кислородом воздуха (окислов) и с азотом (нитридов).

Таким образом, нами была сформулирована задача провести металлографические исследования для определения, во-первых, зависимости между скоростью движения упрочняющего электрода, мощностью генератора импульсов и толщиной формируемого покрытия, а во-вторых, выявить существование переходного слоя, который бы указывал на происхождение диффузионных процессов. Для этого необходимо исследовать микротвердость изделия от поверхностного слоя внутрь.

Интенсивность протекания процесса упрочнения можно определить исходя из сформированного покрытия и режима его нанесения.

3.1.1 Методика исследований.

Металлографические исследования образцов с покрытием из твёрдых сплавов, не содержащих вольфрам, проводились для изучения

взаимодействия материала основы и материала упрочняющего электрода, а также для исследования взаимосвязей между скоростью перемещения электрода, мощностью источника импульсов и толщиной покрытия.

Физико-механические свойства материалов электродов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Физико-механические свойства материалов электродов

Наименование электрода	Химический состав электрода	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	$\sigma_{изг}$, кг/мм ²
СТИМ-3	TiC-Cr ₃ C ₂ -10Ni	5,37-5,38	92,5-93,0	90-100
СТИМ-2	79TiC-16Ni-5Mo	5,4-5,43	90,0-91,0	100-110

Покрытия наносились на установке Элитрон-22А при различных режимах установленной мощности, представленных в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы нанесения покрытий

Режим установки	1	2	3
Сила тока I, А	0,6	0,9	1,2

Исследуемые упрочненные образцы при помощи электроэрозионного станка разрезались в направлении по нормали к скорости перемещения электрода, а затем образец заливался токопроводящим быстротвердеющим материалом в металлическом кольце. После этого образец подвергался шлифованию, полированию и травлению в растворе HNO₃. Затем образцы промывались и изучались под микроскопами «Neofot 32» и «AxioTec».

Микротвёрдость шлифов определялась микротвердомером «Lits minilout 2» при помощи метода Кнупа. Пирамида Кнупа применяется для точного измерения микротвердости в тонких поверхностных слоях и покрытиях. Конические наконечники позволяют исключить влияние анизотропии на различных металлографических плоскостях образцов. Точность и

надежность результатов измерения микротвёрдости зависит от правильности размещения отпечатков на испытуемом образце.

Для обработки результатов экспериментов применялись методы статистической обработки. А именно для каждого отдельного исследования с определенным количеством повторений находили среднее арифметическое значение

$$y_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju},$$

где u – номер исследования;

n – количество повторений исследований;

y_{ju} – значение параметра при u -том повторении.

Исходя из данных измерений находилась дисперсия:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - y_j)^2.$$

Ошибка опыта находилась, как квадратный корень из дисперсии

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - y_j)^2}.$$

Число опытов принималось таким, чтобы полученная ошибка не была выше пятипроцентного уровня значимости.

3.1.2 Результаты исследований.

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены итоги металлографических экспериментов упрочненных образцов с помощью электронного микроскопа с увеличением в 1000 и 2000 раз. Различно, что под не травящимся белым слоем нанесенного покрытия толщиной 5-15 мкм находится переходный слой с толщиной 10-20 мкм. Их толщина зависит от скорости движения упрочняющего электрода и мощности генератора источников импульсов.

То же отмечено исследователями [22]. Они описывают, что в процессе электроискрового упрочнения значительно изменяются физико-механические характеристики верхних слоев заготовки (катада). Для оптимизации электроискрового легирования, прогнозирования свойств полученного покрытия необходимо знать характеристики получаемого на поверхности полиматериала, а они будут зависеть от свойств изначальных материалов заготовки и электрода.

При электроискровом легировании на поверхностях катада и анода формируется слой с измененной структурой, который с воздействием на него химических веществ (травителей), применяемых для распознавания микроструктур материалов в сплавах, остается белого цвета, а это значит, что его выявление его структуры данным способом не представляется возможным.

Присутствие переходного слоя между покрытием и основной, в котором просматриваются элементы материала электрода, проникшие в структуру материала основы, удостоверяет о том, что техпроцесс электроискрового легирования сопровождается диффузионными взаимодействиями анодного и катодного материалов в переходном слое.

Из выполненных металлографических исследований вытекает, что при электроискровом нанесении покрытий диффузионные процессы между компонентами покрытия и основного материала обуславливают прочность связи материалов катада с покрытием.

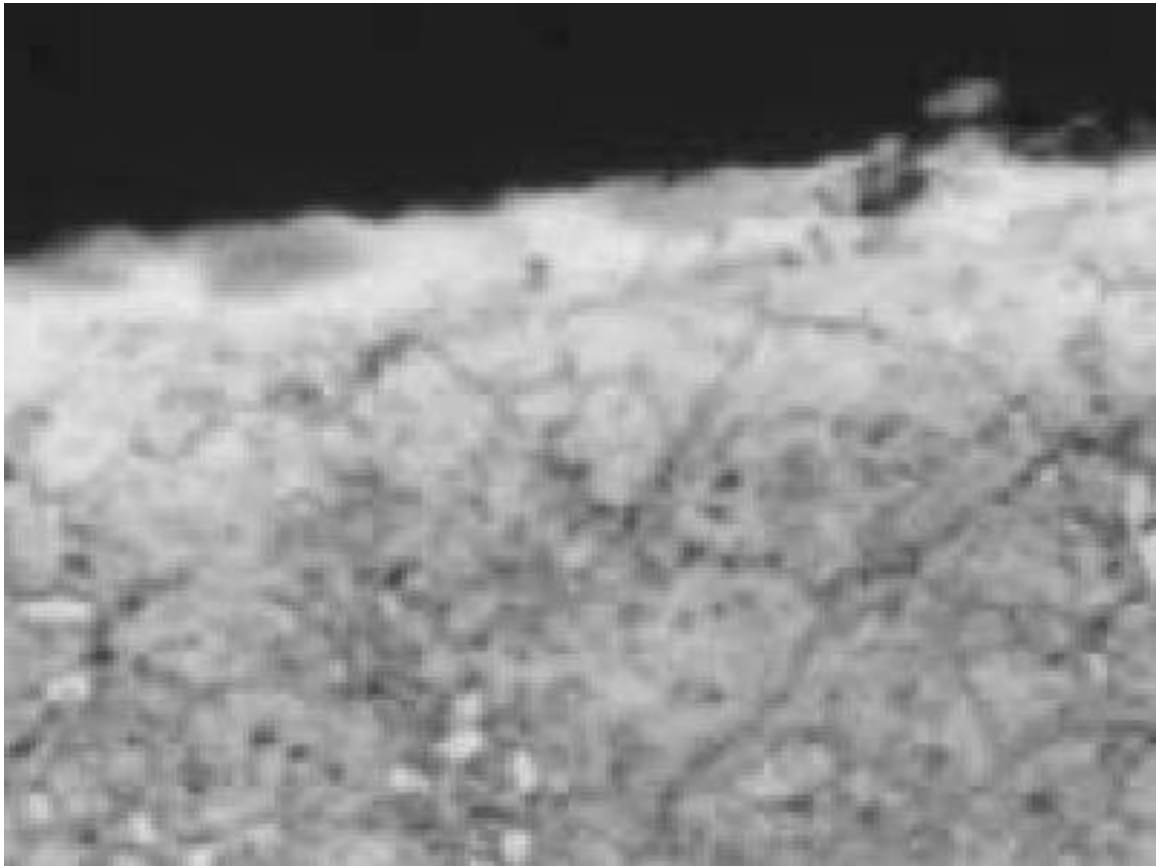


Рисунок 3.1. Фотография микрошлифа образца из быстрорежущей стали с покрытием СТИМ-2, увеличение x2000.

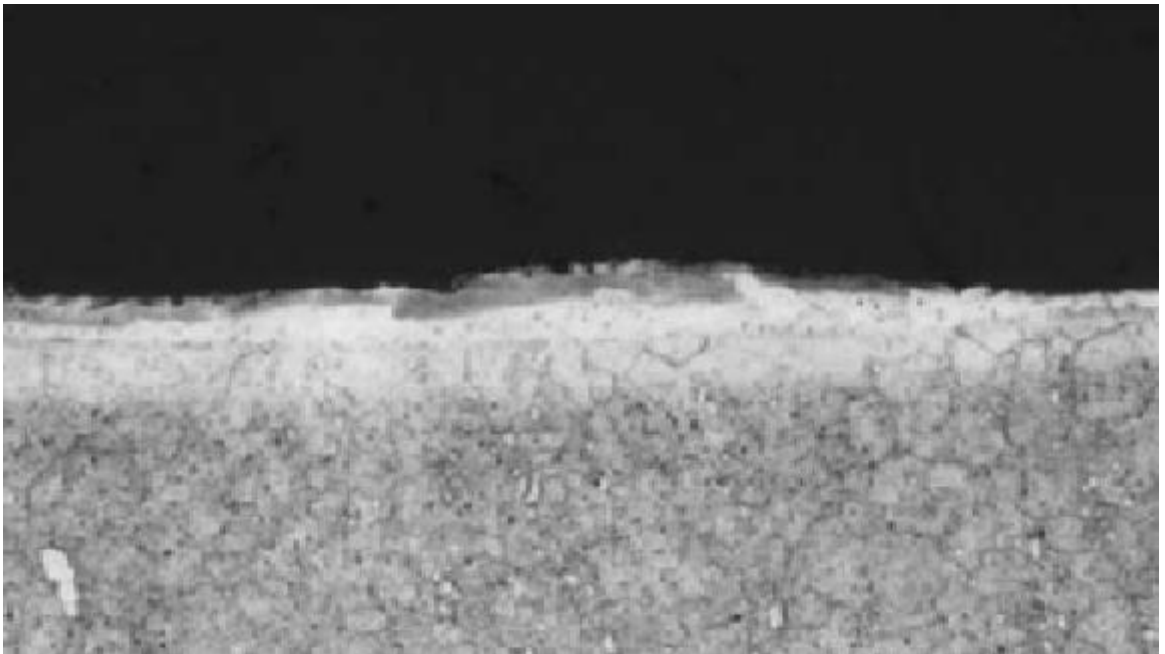


Рисунок 3.2. Фотография микрошлифа образца из быстрорежущей стали с покрытием СТИМ-2, Увеличение x1000.

Проводилось исследование микротвёрдости с нанесенным покрытием на микротвердомере. Замеры велись в направлении от покрытия к сердцевине образцов. Результаты измерений занесли в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерения микротвердости

Режим нанесения покрытия на образец, тип электрода, материал основы	Режим 3, СТИМ-2, конструкция сталь	Режим 2, СТИМ-2, конструкция сталь	Режим 1, СТИМ-2, конструкция сталь	Режим 2, СТИМ-2, быстрорежущая закаленная сталь
Замер микротвёрдости от поверхности образца к сердцевине (НК 0,1)	855 748 410 240 240	850 490 266 266 250	795 375 287 230 230	1409 985 1079 1091 1079
Дистанция от поверхности с покрытием, мкм	10 30 50 80 110	20 40 70 100 130	10 30 50 80 110	8 14 22 36 50

Используя данные таблицы 3.3, создадим графики зависимости микротвёрдостей материалов образцов по мере удаления измерения от поверхности упрочнения.

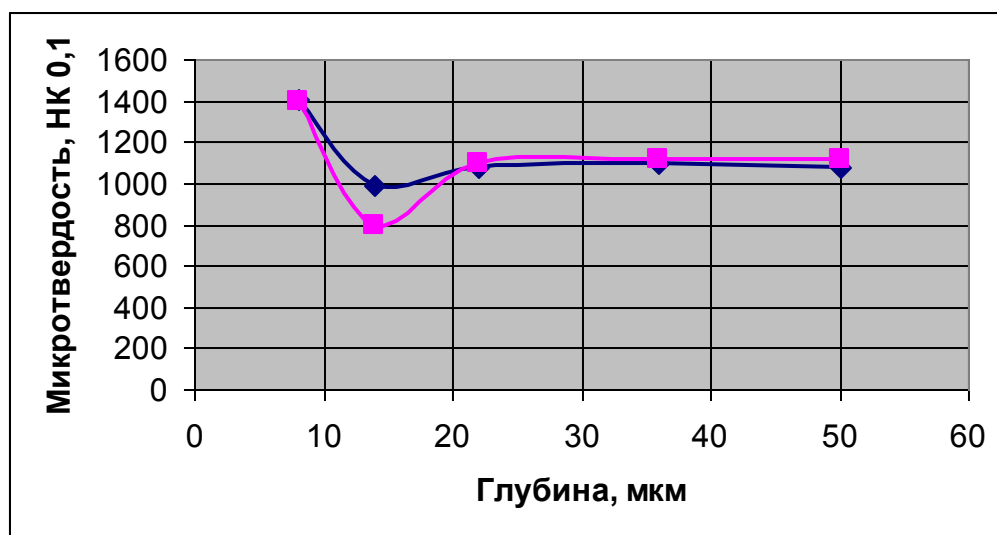


Рисунок 3.3. Графики микротвёрдости опытных образцов из стали Р6М5 с покрытием из СТИМ-2, нанесенных на режимах 2 и 3.

Эксперименты определения микротвёрдости обнаружили наличие переходного слоя, имеющего меньшую твёрдость, чем у основного материала. Это свидетельствует о том, что данный слой подвергся вторичному отпуску.

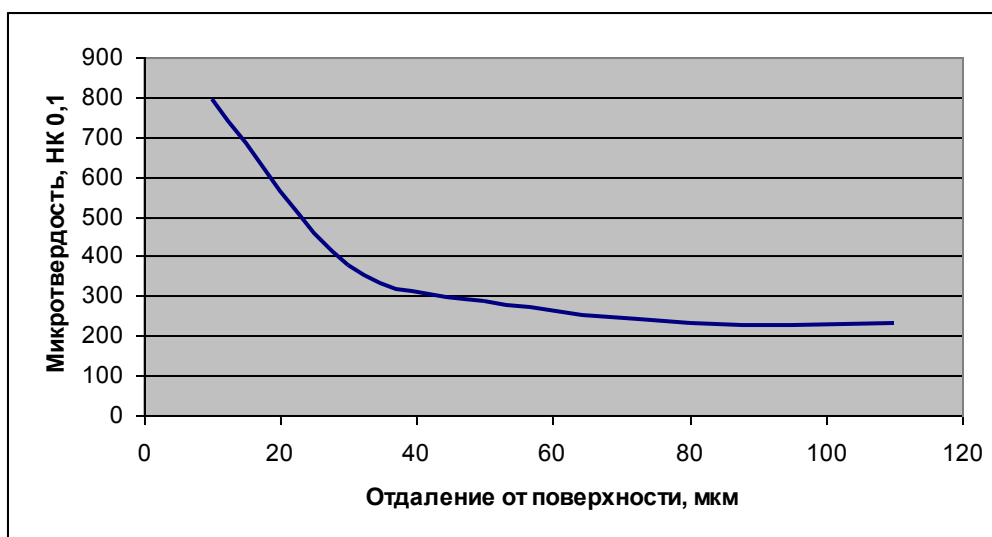


Рисунок 3.4. График микротвёрдости опытного образца из стали Р6М5 с покрытием СТИМ-2, нанесенного на режиме 1.

Следовательно, исходя из проделанных металлографических исследований, можно утверждать, что температурный режим процесса определяет физико-механические характеристики формируемого покрытия.

3.2 Трибологические исследования образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом

Износостойкость режущего инструмента во многом зависит от трибологических характеристик режущего инструмента и обрабатываемого материала. Снижение показателя трения между ними ведет к увеличению износостойкости инструмента, а значит увеличивает его срок службы и затраты на производство предприятия в целом.

Существует множество методов снижения характеристик трения, частным случаем из них является нанесение износостойкого покрытия на инструмент. В этом случае в качестве одного из составляющих в паре трения выступает материал покрытия.

Нами покрытие наносилось методом электроискрового легирования.

Интенсивность изнашивания инструмента при обработке резанием в первую очередь зависит от физических явлений в контакте режущего инструмента с обрабатываемым материалом – задней поверхности инструмента с обрабатываемой заготовкой и передней его поверхности со сходящей стружкой. Характер этих явлений обуславливается как свойствами материалов инструмента и заготовки (химический состав и состояние, твердость, прочность, адгезионная способность, взаимная растворимость и др.), так и условиями обработки, такими как скорость резания, наличие и вид охлаждения и др. Среди контактных явлений, определяющих интенсивность изнашивания инструмента, важная роль принадлежит трению. Влияние трения на интенсивность изнашивания инструмента может быть непосредственным, определяющим интенсивность так называемого абразивного изнашивания; опосредственным, определяющим интенсивность

тепловыделения в контакте и, следовательно, температуру контакта, от которой в первую очередь зависит диффузионное изнашивание; непосредственно-опосредственным, влияющим на интенсивность адгезионного изнашивания как непосредственно, так и через температуру контакта. При этом все три вида изнашивания имеют место одновременно, хотя в зависимости от конкретных условий обработки какой-то из них может в каждом конкретном случае быть преобладающим.

С целью определения оптимальных областей применения того или иного покрытия рабочих поверхностей режущего инструмента для различных условий обработки проведены исследования влияния на трение в контакте инструмента с заготовкой, вида обрабатываемого материала, типа покрытия, скорости взаимного перемещения инструмента и заготовки, наличия искусственного охлаждения.

Исследования проводили на экспериментальной установке на базе токарно-винторезного станка фирмы РАМО, оснащенной установленной на суппорте тензометрической державкой, тензостанцией и регистрирующей аппаратурой. Схема установки приведена на рисунке 3.5. В качестве материалов заготовки исследованы закаленная сталь марки 40ХГНМ, высокопрочный чугун марки ВЧ 40-10 и алюминиевый сплав АК5М2. В качестве инструментальных материалов исследованы покрытия из безвольфрамовых твердых сплавов 1 и 2, разработанными ИСМАН РАН (г. Черноголовка). Химический состав этих сплавов приведен в таблице 3.4.

Покрытия наносились на образцы из закаленной стали методом электроискрового легирования на электроискровой установке ЭЛИТРОН-22А, а также быстрорежущая сталь Р6М5 без покрытия. Цилиндрическую заготовку 1 диаметром 100 мм закрепляли в кулачках 2 самоцентрирующего патрона, образцы 3 инструментального материала с размером площадки 30×10 мм устанавливали в резцедержателе 4 станка.

Таблица 3.4 - Характеристики материала электрода

№ пп	Структура электрода	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	$\sigma_{изг}$, кг/мм ²
1	79TiC-16Ni-5Mo	5,4-5,43	90,0-91,0	100-110
2	TiC-Cr ₃ C ₂ -10Ni	5,37-5,38	92,5-93,0	90-100

Тарирование системы выполняли с помощью гирь массой 2, 4, 6 и 8 кг в двух направлениях – в направлении силы нормального давления N и в направлении силы трения F . Перемещение образцов осуществляли с помощью механизма поперечной подачи станка. После начала контакта образца с вращающейся заготовкой включали рабочую поперечную подачу и измеряли величину сил N и F . Величину силы N регулировали в пределах 100...300 Н. Коэффициент трения f определяли как отношение F/N . Скорость взаимного перемещения заготовки относительно образца задавали с помощью коробки скоростей станка в пределах $V = 100 - 300$ м/мин. Исследования проводили как с применением смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), так и без охлаждения.

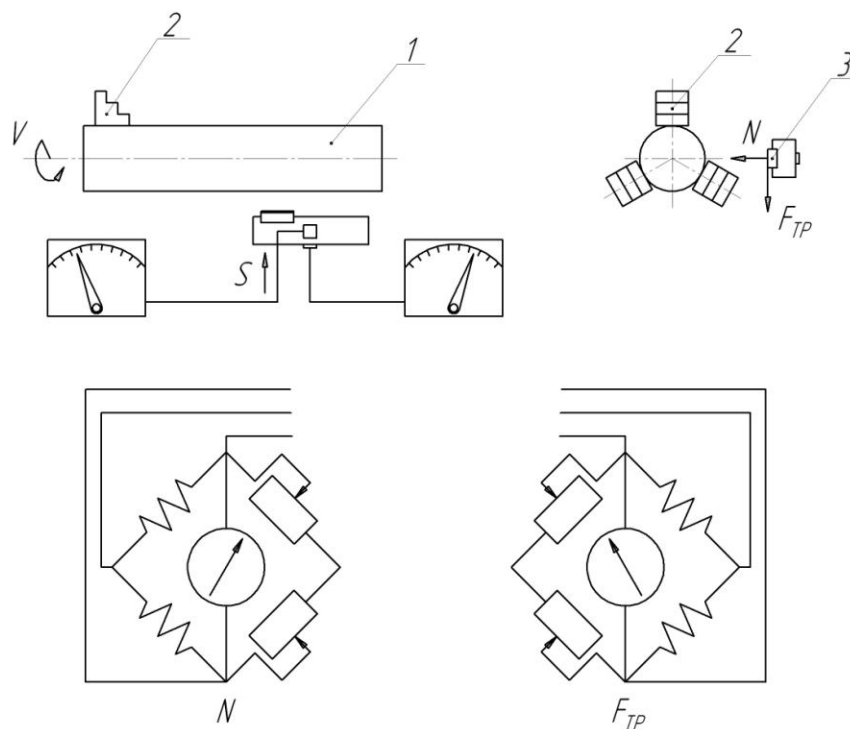


Рисунок 3.5. Схема экспериментальной установки

Средние значения f приведены в таблице 3.5. Для наглядности результаты экспериментов представлены на рисунках 3.6а – е. Проанализируем их.

Таблица 3.5 - Значения коэффициента трения при различных условиях обработки

Материал инструмента	V, м/мин	Обрабатываемый материал					
		Сталь		Чугун		Алюминий	
		без охлаждения	с охлаждением	без охлаждения	с охлаждением	без охлаждения	с охлаждением
Р6М5	100	0,66	0,35	0,50	0,50	1,40	0,39
	200	0,55	0,18	0,40	0,29	1,36	0,24
	300	0,40	0,14	0,38	0,20	1,34	0,21
Твердый сплав 1 (ТС1)	100	0,80	0,36	0,75	0,29	0,85	0,30
	200	0,71	0,24	0,60	0,16	0,80	0,19
	300	0,69	0,23	0,56	0,12	0,76	0,16
Твердый сплав 2 (ТС2)	100	0,71	0,33	0,65	0,28	0,91	0,35
	200	0,60	0,22	0,50	0,15	0,80	0,21
	300	0,58	0,20	0,45	0,10	0,78	0,18

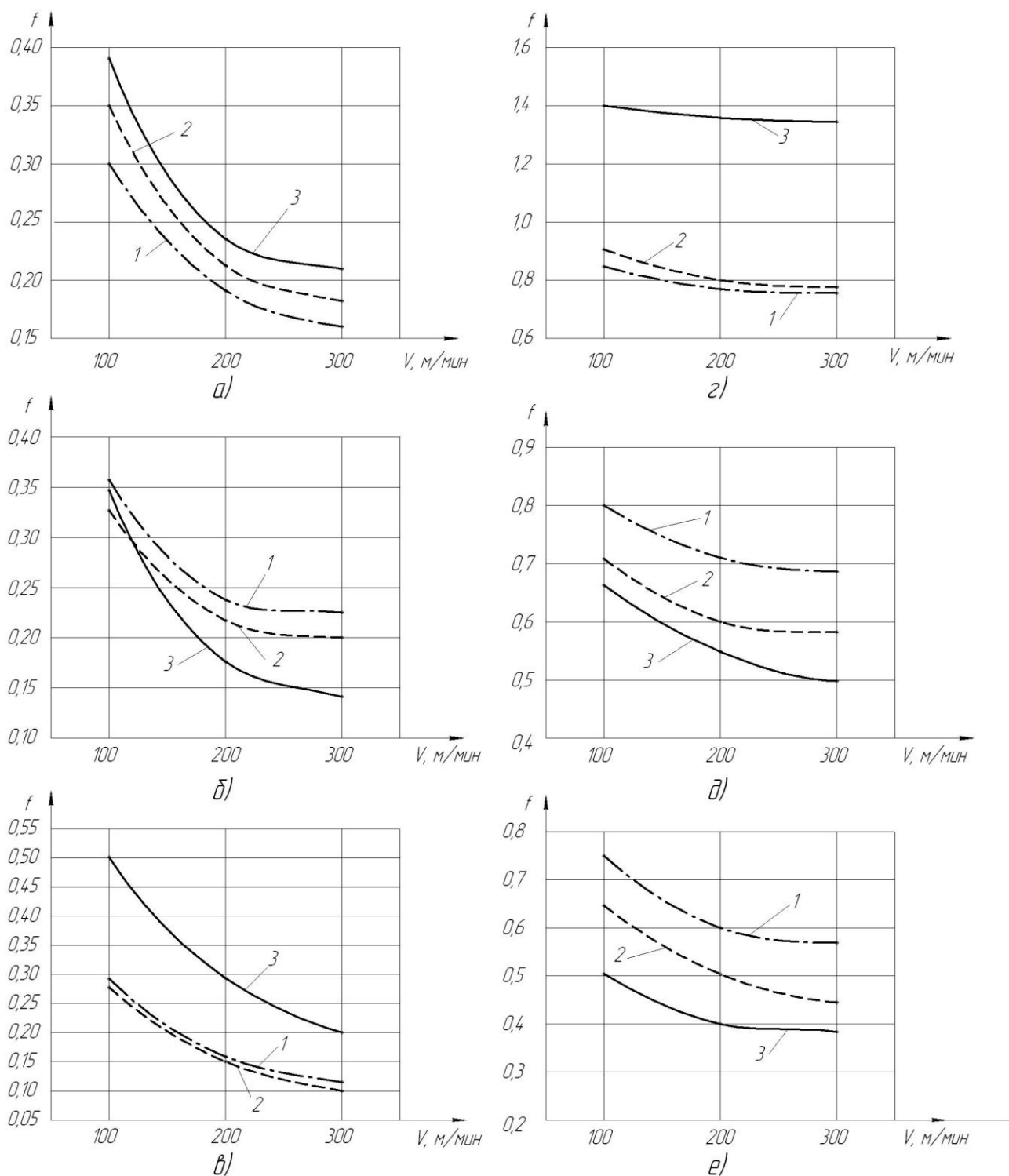


Рисунок 3.6 - Графики влияния скорости резания на коэффициент трения образцов, упрочненных ТС1 (кривые 1), ТС2 (2) и образцов из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия (3) в контакте с конструкционными материалами: *a* – с алюминием с применением СОТС; *б* – со сталью с СОТС; *в* – с чугуном с СОТС; *г* – с алюминием без СОТС; *д* – со сталью без СОТС; *е* – с чугуном без СОТС.

Из рисунка 3.6,*а* видно, что увеличение скорости резания до 300 м/мин приводит к уменьшению коэффициентов трения. Наименьшие значения коэффициента трения по алюминию с охлаждением имеют образцы, упрочненные ТС1, затем ТС2 и худшие показатели имеют образцы из быстрорежущей стали без покрытия.

Из рисунка 3.6,*б* следует, что коэффициенты трения при испытании образцов с покрытием ТС1, ТС2 выше коэффициентов трения образцов из быстрорежущей стали без покрытия в паре со сталью с применением СОТС, что говорит о том, что для обработки заготовок из стали такой инструмент не может быть рекомендован.

При сравнении результатов испытаний на трение по чугуно с охлаждением образцов с покрытием ТС1 и ТС2 и образцов из стали Р6М5 без покрытия установлено (рисунок 3.6,*в*), что коэффициенты трения в паре ТС1 – чугун и ТС2 - чугун значительно ниже, чем – в паре быстрорежущая сталь - чугун. Покрытие ТС1 в этом сравнении выглядит предпочтительнее.

Из графиков, представленных на рисунке 3.6,*г* следует, что при испытаниях без СОТС коэффициенты трения образцов, упрочненных ТС1 и ТС2 значительно меньше, чем образцов из быстрорежущей стали. Это объясняется тем, что в контакте алюминий-железо наблюдается эвтектическое соединение, сопровождаемое прочными физико-химическими связями. Это явление говорит о нецелесообразности применения инструмента из быстрорежущих сталей при обработке алюминиевых заготовок. Меньший коэффициент трения показали образцы с покрытием ТС1.

Исследования коэффициентов трения образцов с покрытием ТС1, ТС2 и образцов из быстрорежущей стали в контакте со сталью и чугуно без применения СОТС (рисунок 3.6,*д*) показывают, что безвольфрамовые покрытия в температуронапряженных процессах уступают инструменту из быстрорежущей стали. Такой же эффект показали аналогичные испытания в

паре с чугуном без применения СОТС (рисунок 3.6,е). Это объясняется тем, что карбиды титана и карбиды хрома, составляющие основу безвольфрамовых сплавов, в условиях высокой температурной напряженности процессов имеют коэффициенты трения меньшие, чем смесь карбидов железа и карбидов вольфрама, составляющих основу быстрорежущей стали. Следовательно, инструмент с безвольфрамовыми покрытиями нельзя рекомендовать для обработки стали и чугуна без охлаждения.

По результатам выполненных экспериментов выполним следующие выводы:

1) наименьшее значение коэффициента трения в контакте с алюминиевым сплавом при работе как с охлаждением, так и без него обеспечивает инструмент с покрытием ТС1, наибольшее – инструмент из быстрорежущей стали без покрытия;

2) наименьшее значение коэффициента трения в контакте со сталью при работе как с охлаждением, так и без него обеспечивает инструмент из быстрорежущей стали без покрытия, наибольший – инструмент с покрытием ТС1;

3) наименьшее значение коэффициента трения в контакте с чугуном при работе без охлаждения обеспечивает инструмент из быстрорежущей стали без покрытия, наибольший – инструмент с покрытием ТС1; при работе с охлаждением наименьший коэффициент трения обеспечивает инструмент с покрытием ТС2, наибольший – Р6М5 без покрытия.

Исходя из этого, можно предложить следующие рекомендации для выбора оптимального материала режущего инструмента при обработке различных конструкционных материалов и представить это в виде таблицы 3.6.

Таблица 3.6 - Рекомендуемые материалы режущего инструмента для обработки различных конструкционных материалов

Наличие охлаждения	Обрабатываемый материал		
	Алюминиевый сплав	Сталь	Чугун
Без охлаждения	ТС1	P6M5	P6M5
С охлаждением	ТС1	P6M5	ТС2

3.3 Моделирование динамики коэффициента трения с помощью дамми-переменных

Введем обозначения: результирующий фактор Y - коэффициент трения, факторные признаки: x_1 - скорость резания, x_2 -обрабатываемый материал, x_3 - материал инструмента, x_4 -режим нанесения покрытия, x_5 -использование СОЖ. Поскольку факторы x_2 - x_5 являются качественными переменными, то они входят в модель как дамми-переменные. Факторы x_2 - x_4 имеют по 3 градации, поэтому они описываются двумя бинарными переменными (например, x_2 описывается z_{21} и z_{22}), фактор x_5 имеет 2 уровня, поэтому он описывается одной бинарной переменной. Значения всех фиктивных переменных приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Дамми-переменные и им соответствующие бинарные переменные

Дамми-переменные	Бинарные переменные, соответствующие фактору		Уровни фактора
	1	2	
X_2	Z_{21}	Z_{22}	$z_{21}=1, z_{22}=0$, если обрабатываемый материал – алюминий $z_{21}=0, z_{22}=1$, если обрабатываемый материал – сталь

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4
			$z_{21}=0, z_{22}=0$, если обрабатываемый материал - чугун
X_3	Z_{31}	Z_{32}	$z_{31}=1, z_{32}=0$, если материал инструмента – СТИМ-2 $z_{31}=0, z_{32}=1$, если материал инструмента – СТИМ-3 $z_{31}=0, z_{32}=0$, если материал инструмента – Р6М5 без покрытия
X_4	Z_{41}	Z_{42}	$z_{41}=1, z_{42}=0$, если используется режим 3 $z_{41}=0, z_{42}=1$, если используется режим 2 $z_{41}=0, z_{42}=0$, если используется режим 1
X_5	Z_5		$z_5=1$, если применяется СОЖ $z_5=0$, если не применяется СОЖ

Для исследования взаимного влияния все факторов проведем корреляционный анализ, построим матрицу корреляций (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Матрица корреляций исследуемых факторов

	Y	x_1	z_{21}	z_{22}	z_{31}	z_{32}	z_{41}	z_{42}	z_5
Y	1								
x_1	-0,20	1							
z_{21}	0,34	0	1						
z_{22}	-0,10	0	-0,5	1					
z_{31}	0,01	0	$-4,6 \cdot 10^{-18}$	$-4,6 \cdot 10^{-18}$	1				
z_{32}	-0,11	0	$-4,6 \cdot 10^{-18}$	$1,39 \cdot 10^{-17}$	-0,5	1			
z_{41}	-0,20	0	$8,78 \cdot 10^{-18}$	-0,32	0,63	-0,32	1		
z_{42}	0,06	0	$4,36 \cdot 10^{-18}$	0,24	$2,18 \cdot 10^{-17}$	0,71	-0,45	1	
z_5	-0,77	0	$3,05 \cdot 10^{-17}$	$-4,4 \cdot 10^{-18}$	$3,05 \cdot 10^{-17}$	$-4,4 \cdot 10^{-18}$	0,15	-0,11	1

Для проверки значимости коэффициентов корреляции использовался критерий Стьюдента. Анализ показал, что наиболее сильно на величину коэффициента трения влияет фактор применения СОЖ (z_5), фактор использования в качестве обрабатываемого материала - сталь влияет слабо, все остальные влияют незначимо или очень слабо. Интересен тот факт, что различные уровни одного фактора влияют на результат по-разному: один уровень предполагает положительную корреляцию, другой - отрицательную.

Согласно теста Фаррара-Глоубера матрица межфакторных корреляций демонстрирует мультиколлинеарность, в частности, линейно-зависимыми оказались факторы z_{32} (использование материала СТИМ-3) и z_{41} (включение режима 3), что с технологической точки зрения оправдано, а с точки зрения эконометрического моделирования означает невозможность включения двух данных факторов в модель одновременно.

Модель зависимости коэффициента трения от условий эксперимента с участием дамми-переменных выглядит следующим образом (в скобках указаны стандартные ошибки параметров регрессии):

$$Y = 0,833 - 0,001x_1 + 0,239z_{21} + 0,027z_{22} + 0,110z_{31} - 0,202z_{41} - 0,089z_{42} - 0,478z_5$$

$$(0,077) \quad (0,000) \quad (0,056) \quad (0,062) \quad (0,070) \quad (0,104) \quad (0,054) \quad (0,045)$$

Практическая значимость, предложения и результаты внедрений, результаты экспериментальных исследований.

Следует отметить, что построенная модель адекватна по большинству критериев адекватности: по критерию Фишера, по величине коэффициента детерминации, по средней ошибке аппроксимации (табл. 3.9). Высокий коэффициент детерминации говорит о хорошем качестве модели, 72,1 процента вариации коэффициента трения описывается построенной регрессионной моделью, уравнение регрессии в целом значимо, средняя ошибка аппроксимации является допустимой. Незначимой оказалась только бинарная переменная z_{22} , переменные z_{31} , z_{42} условно значимы, а все остальные значимы по критерию Стьюдента. Модель не является эластичной ни по одному из факторов, но это не умаляет ее достоинств. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о влиянии условий эксперимента на изменение коэффициента трения. Таким образом, построенная модель динамики коэффициента трения позволяет анализировать влияние каждого фактора на результат в отдельности и в совокупности, а также прогнозировать результат в исследуемой области режимов резания.

Таблица 3.9 – Оценка адекватности модели с помощью различных критериев

Скорректированный коэффициент детерминации	Критерий Фишера	Критерий Стьюдента	Средняя ошибка аппроксимации	Средние коэффициенты эластичности
$R^2 = 0,721$ $R^2_{crit} = 0,5$	$F = 22,86$ $F_{crit}(0,05;8;45) = 2,15$	$t_0 = 10,79$ $t_1 = - 2,84$ $t_{21} = 4,26$ $t_{22} = 0,43$ $t_{31} = 1,57$ $t_{41} = - 1,94$ $t_{42} = - 1,64$ $t_5 = - 10,55$ $t_{crit}(0,05;52) = 2,01$	$A_{cp} = 8,57\%$ $A_{crit} = 10\%$	$\mathcal{E}_1 = - 0,32$ $\mathcal{E}_{21} = 0,16$ $\mathcal{E}_{22} = 0,02$ $\mathcal{E}_{31} = 0,08$ $\mathcal{E}_{41} = - 0,07$ $\mathcal{E}_{42} = - 0,09$ $\mathcal{E}_5 = - 0,49$

Интерпретируем коэффициенты полученной модели, поскольку они характеризуют влияние каждого из факторов на коэффициент трения:

- увеличение скорости резания на 100 м/мин снижает в среднем коэффициент трения на 0,08;
- использование в качестве обрабатываемого материала алюминия приводит к повышению коэффициента трения на 0,239, а стали – всего на 0,027;
- использование в качестве материала инструмента СТИМ-2 способствует росту коэффициента на 0,110;
- использование в качестве режима нанесения покрытия режима 3 приведет к уменьшению коэффициента трения на 0,202, режима 2 – на 0,089;
- наличие СОЖ оказалось самым эффективным фактором снижения коэффициента трения (в среднем на 0,478).

Полученный (моделируемый) уровень прироста коэффициента трения согласуется с имеющимися результатами экспериментов.

Огромным положительным эффектом данного подхода к моделированию является включение большого числа факторов исследуемого процесса (условий эксперимента).

Очевидно, что аналогичная эконометрическая модель может быть построена и для других областей режимов резания и с большим числом параметров или условий эксперимента и при этом в каждом случае модель будет обладать своими особенностями.

Выводы по разделу.

Моделирование различных технологических процессов обычно сталкивается с большими сложностями из-за наличия большого числа качественных переменных. Применение эконометрического инструментария позволяет не только справиться с такими трудностями, но и использовать модель для анализа всех качественных и количественных факторов, для учета силы влияния каждого из них на результативную переменную, в данном случае на величину коэффициента трения.

Построенная эконометрическая модель с включенными в неё дамми-переменными демонстрирует возможности эконометрического исследования. Такой подход позволяет более детально и всесторонне исследовать динамику процессов резания. В частности, при решении вопроса о приоритетной значимости условий эксперимента, что имеет существенное значение с практической точки зрения. Кроме того, использование многофакторного анализа позволяет явным и адекватным образом моделировать процесс взаимодействия контактирующих тел, что является принципиально важным для корректного решения динамических задач трения, поскольку дает возможность учитывать каждое условие эксперимента.

Важным результатом работы является определение параметров, характеризующих влияние каждого фактора на результат в отдельности и ранжировать факторы по силе влияния на величину результативного фактора. Более всех, как показал анализ построенной модели, определяет величину коэффициента трения наличие или отсутствие СОЖ.

Для более глубокого понимания и детального анализа подобных вопросов необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанных работ можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель процесса электроискрового легирования, решение которой дало возможность определить связи между скоростью перемещения упрочняющего электрода, мощностью генератора импульсов и толщиной формируемого покрытия.
2. Разработана система оптимизации режимов упрочнения для различных материалов.
3. Определена сфера таких режимов техпроцесса электроискрового легирования, при которых исключается его отслаивание.
4. Изготовлена установка и разработана методика для трибологических испытаний образцов с покрытиями.
5. Результаты математической обработки результатов трибологических исследований показали, что наиболее важным параметром в процессе является действие смазочно-охлаждающей жидкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kornienko, L.P. Use of electrospark alloying method to increase the corrosion resistance of a titanium surface / L.P. Kornienko, G.P. Chernova, V.V. Michailov, A.E. Gitlevich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Т. 47. N1. С. 9-17.
2. Electrospark alloying of titanium and its alloys the physical, technological and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance / V.V. Mikhailov, Gitlevich A.E., Mikhailyuk A.I., Verkhoturov A.D., Belyakov A.V., Konevtsov L.A. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013. Т. 49. N5. С. 373-395.
3. Намитоков, К.К. К вопросу о возникновении и развитии низковольтных разрядов. // В сб.: Электроискровая обработка металлов. Москва: Издательство АН СССР. 1963. С.44-55.
4. Намитоков, К.К. Электроэрозионные явления. Москва: Энергия. 1978. 456 с.
5. Золотых, Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер // Москва: Машиностроение. 1977. С. 43.
6. Чаругин, Н.В., Литвиенко, А.Т. Электроискровое легирование лезвийного и штампового инструмента // Технология и организация производства. 1986. N3. С. 45-46.
7. Bushik, A.I. Investigation or the character of erosion of the cathode surface exposed to the vacuum pulse arc discharge / A.I. Bushik, I.A. Bakuto, V.A. Shilov, P.S. Zachepilo, S.V. Bushik // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 1996. С. 796-798.
8. Бурумкулов, Ф.Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В Сенин и др. Саранск: Типография «Красный Октябрь». 2003. 504 с.

9. Равновский, В., Левченко, Г., Теодорович, О. Разрывные контакты электрических аппаратов / В. Равновский, Г. Левченко, О. Теодорович. Москва-Ленинград: Энергия. 1966. 295 с.
10. Лебедев, В.К. и др. Сварка трением: Справочник. Ленинград: Машиностроение. 1987. 236 с.
11. Верхотуров, А.Д. Исследование поверхностных слоев вольфрамсодержащих твёрдых сплавов при электроискровом легировании алюминием / А.Д. Верхотуров, Л.А. Коневцов, П.С. Гордиенко, Е.С. Панин, Л.П. Метлицкая // Вопросы материаловедения. 2006. № 3. С. 52-63.
12. Larikov, L.N. Study of the diffusion transfer in nanocrystalline materials / L.N. Larikov, S.I. Sidorenko, N.P. Deyneka, T.V. Litvinova // Metal Physics and Advanced Technologies. 2001. Т. 19. N2. С. 235-240.
13. Larikov, L.N. The conditions of boundary front instability during interdiffusion in CO-GA system / L.N. Larikov, Y.O. Maksimenko // Metal Physics and Advanced Technologies. 2001. Т. 19. N4. С. 593-598.
14. Галинов, И.В. Оценка величины термической эрозии на аноде и катоде при электроискровом легировании металлов / И.В. Галинов, Р.Б. Лубан // В сб.: Современные проблемы физического материаловедения. АН СССР. Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Научный совет АН УССР по проблемам «Порошковая металлургия»; Редкол.: Скороходов В.В. и др. Киев. 1990. С. 118-127.
15. Рыбалко, А.В. Электрические параметры процесса электроэрозионного легирования / А.В. Рыбалко, В.И. Хамухарь // Электронная обработка материалов. 1988. № 6. С. 18-20.
16. Буткевич, Г.В. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.Я. Парканский и др. М.: Энергия, 1978. 256 с.
17. Золотых, Б.Н. Физические основы электроискровой обработки материалов. // Москва: Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры. 1953. 107 с.

18. Галинов, И.В. О механизме электрического замыкания межэлектродного промежутка при электроискровом легировании металлов / И.В. Галинов, Р.В. Лубан, Л.С. Пеккер // Электронная обработка материалов. 1990. №6. С. 11-13.
19. Белкин, Г.С. Методика расчета величины эрозии сильноточных контактов при воздействии электрической дуги // Электричество. 1972. №1. С. 61-65.
20. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. Москва: Наука. 1987. 592 с.
21. Теслина, М.А. Формирование эрозионных частиц при электроискровой обработке / М.А. Теслина, С.Н. Химухин, А.Д. Верхотуров // Упрочняющие технологии и покрытия, 2007. №8. С. 45-48.
22. Палатник, Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. ДАН СССР. 1953. Т.89. № 3. С. 455-458.
23. Hanke, E. Standzeiterhöhung durch Hartung mittels elektrischer Entladung. – Fertigungstechnik. 1958. N 2. S. 53-59.
24. Kahlon, C.S. and ets. Electric spark toughening of cutting tools and steel components. – Machine Tool Des. And Res. 1970. v. 10. P. 95-121.
25. Nosov, A.V., Bykov, B.V. Working Metals by Electro-sparking. MMSO. London. 1956. P. 34-38.
26. Андреев, В.И. Механизация электроискрового упрочнения поверхностей деталей со сложной фасонной формой. // Электронная обработка материалов. 1978. №1. С. 80-83.
27. Золотых, Б.Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. Москва- Ленинград: Госэнергоиздат. 1951. 55 с.
28. Могилевский, И.З. Структурные изменения в железе и стали после электроискровой обработки их поверхности графитом. // В сб.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Издательство АН СССР. 1963. С. 56-68.

29. Могилевский, И.З. Металлографические исследования поверхностного слоя стали после электроискровой обработки / И.З. Могилевский, С.А. Чеповая // Электроискровая обработка металлов. Москва: Издательство АН СССР. 1960. С. 86-97.
30. Hanke, E. Standzeiterhöhung durch partiell Hartung im Funken Fertigungstechnik. 1957. Bd. N 3. S. 124-125.
31. Иванов, Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. Москва: Машиностроение. 1961. 303 с.
32. Перцев, Н.В. О поверхностной активности жидких металлических покрытий и их влиянии на прочность металлов / Н.В. Перцев, П.А. Ребиндер, ДАН СССР. 1958. Т.123. №6. С. 1068-1070.
33. Шевелева, Т.А. Новые электродные материалы для электроискрового легирования / Т.А. Шевелева, В.Н. Шушунов, С.В. Николенко // В сб.: Новые материалы для порошковой металлургии и защитных покрытий: Сборник научных трудов, АН СССР Дальневосточное отделение, Институт машиноведения и металлургии. Под редакцией А.Д. Верхотурова. Владивосток. 1990. С. 106-108.
34. Кочетова, И.В. Математическая модель процесса электроискрового легирования / И.В. Кочетова, Ен. Ун. Чье, С.Н. Химухин, К.П. Ерёмина // В сборнике: Информационные технологии XXI века Сборник научных трудов. Ответственный за выпуск Е. А. Шеленок. Хабаровск, 2016. С. 398-402.
35. Гадалов, В.Н. Описание процесса электроискрового легирования (обобщенная модель) / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, В.В. Шкатов, О.А. Тураева, И.В. Ворначёва, А.Ю. Розин // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. N4. С. 58-66.
36. Некрашевич, И.Г. К вопросу о современном состоянии теоретических представлений об электрической эрозии металлов / И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто // В сборнике: Электроискровая обработка металлов. Москва: Издательство АН СССР, 1963, С. 24-28.

37. Некрашевич, И.Г. К вопросу о механизме электрической эрозии металлов / И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто // В сборнике: Сборник научных трудов ФТИ АН БССР. Выпуск 5. Минск: Издательство АН БССР. 1955. С. 167-176.

38. Некрашевич, И.Г. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде / И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто // В сборнике: Сборник научных трудов ФТИ АН БССР, выпуск 6. Минск: Издательство АН БССР. 1960. С. 193-215.

39. Ларииков, Л.Н. Особенности массопереноса при сварке железа в твердом состоянии с импульсным погружением. // Автоматическая сварка. 1974. N5. С. 19-22.

40. Ларииков, Л.Н. Структурные изменения в поверхностных слоях Ст45 при электроискровом легировании / Л.Н. Ларииков, Н.В. Дубовицкая, С.М. Захаров, В.А. Снежков // Электронная обработка металлов. 1981. N6. С.22-24.

41. Логинов, Н.Ю. К вопросу моделирования процесса электроконтактного легирования / Н.Ю. Логинов, Ю.Н. Логинов, О.Ю. Худякова // Металлообработка. N6.2004. С. 13-14.

42. Логинов, Н.Ю. Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенных электроискровым методом // Упрочняющие технологии и покрытия. N2(146). 2017. С. 67-70.

43. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов, том 1, под ред. проф. Смоленцева В.П., М., Высшая школа, 1983г. 242с.

44. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз. 1951. 298 с.

45. Резников, А.Н. Теплофизика резания. Москва: Машиностроение. 1969. 288 с.

46. Гитлевич, А.Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий. Кишинев: Издательство «Штиинца». 1985. 196 с.

47. Михайлов, В.В. Влияние отжига на некоторые свойства поверхностных слоев титана / В.В. Михайлов, А.Д. Верхотуров и др. // В сборнике: Надежность и долговечность деталей машин. Красноярск. 1974. С. 193-198.

48. Верхотуров, А.Д. Влияние электроискрового легирования на повышение жаростойкости вольфрамсодержащих твердых сплавов / А.Д. Верхотуров, А.М. Шпилев, П.С. Гордиенко, Л.А. Коневцов, Е.С. Панин. И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк // Порошковая металлургия. 2008. N1-2. С. 145-150.

49. Астапов, И.А. Моделирование процесса модифицирования поверхности твердых сплавов методом ЭИЛ / И.А. Астапов, А.Д. Верхотуров // Информатика и системы управления. 2007. N2. С. 20-30.

50. Шеমেгон, В.И. Электроискровое легирование лезвийного и штампового инструмента / В.И. Шемегон, М.В. Жук // Машиностроитель. N9. 1989. С. 21-22.

51. Верхотуров, А.Д. К вопросу о микроструктуре, фазовом и химическом составе продуктов эрозии при электроискровом легировании боридами переходных материалов / А.Д. Верхотуров, Л.А. Коневцов, П.С. Гордиенко, Е.С. Панин, Н.Н. Баринов, Л.П. Метлицкая // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. N3. С. 17-25.

ПРИЛОЖЕНИЯ

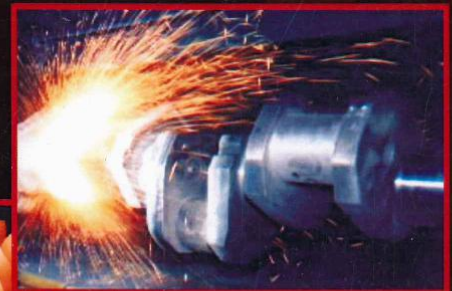
42 — 120
14

НИИ ТЕХНИЧЕСКОГО И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЖУРНАЛА

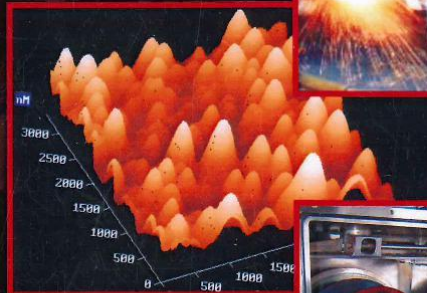
ISSN 1813-1336

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

МЕХАНИЧЕСКАЯ
УПРОЧНЯЮЩАЯ
ОБРАБОТКА



ТЕРМИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА

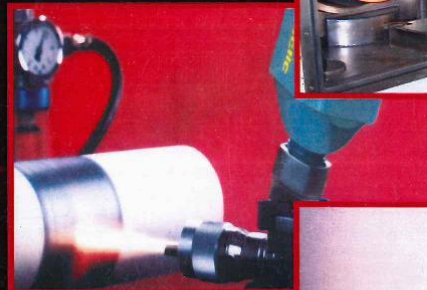


МЕТОДЫ
НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ



КОМБИНИРОВАННАЯ
ОБРАБОТКА

ПЕРСПЕКТИВНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ



КОНТРОЛЬ
КАЧЕСТВА
УПРОЧНЕНИЯ



Том 13
2 (146) / 2017

42 120 74

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13
2017
№ 2 (146)
Февраль

Издается с января 2005 г.

РОССИЙСКАЯ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА
01Н. 5460-17

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного
совета**

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного
редактора**

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК

д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.

В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.

В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

И.Н. МЫИРИНА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.

Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован
в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Безъязычный В.Ф., Матвеев А.С., Семёнов А.Н., Басков М.В. Учет упрочнения материала поверхностного слоя детали, обрабатываемой точением, при расчете остаточных напряжений, обусловленных тепловым фактором.....51

Гурьянов Г.Н. Оценка осевого напряжения при разных моделях упрочнения материала проволоки по формулам, включающим действительный угол волочения и приведенный угол И.Л. Перлина.....54

Логинов Н.Ю. Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом.....67

Табаков В.П., Сизов С.В. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия.....70

Федосов С.А. Определение адгезионных свойств методом идентификации.....73



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Королев А.В., Балаев А.Ф., Савран С.А. Экспериментальное исследование продольной правки стержневых мало жестких деталей регулируемым изгибом.....78



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Балановский А.Е., Ву В.Г. К вопросу определения размера пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке.....82

Панков В.П., Баженов А.В., Панков Д.В., Шепеть И.П. Исследование электропроводности плазменных покрытий на углеродном волокне.....91

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, в базу данных Chemical Abstracts

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2017

Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом

Проведены исследования трибологических характеристик образцов металлорежущего инструмента с покрытием, нанесенным электроискровым методом, а также закономерностей в зоне динамического контакта образцов обрабатываемого инструмента с основными конструкционными материалами (сталью 40ХГНМ, высокопрочным чугуном ВЧ 40-10, алюминиевым сплавом АК5М2). Описана методика определения трибологических характеристик в парах обрабатываемый материал — режущий инструмент. Для каждой пары трения определены материалы, которые имеют меньшие коэффициенты трения. Разработаны рекомендации по практическому применению испытанных образцов инструмента для обработки конструкционных материалов, использованных в эксперименте.

Ключевые слова: трибологические характеристики, электроискровое нанесение покрытий, трение, износостойкость.

Researches of tribological characteristics of samples of metal-cutting tools with coating, which caused the electric-spark method, and regularities in the dynamic contact of key engineering materials (steel, cast iron, aluminum alloy) with the metal-cutting samples. The paper describes a method of determining the tribological characteristics in pairs workpiece material — cutting tool. Identify materials that have smaller coefficients of friction in each friction pair. Recommendations for the practical application of test samples for processing of structural materials are developed.

Keywords: tribological characteristics, electric-spark coating, friction, wear resistance.

Износостойкость режущего инструмента во многом зависит от трибологических характеристик режущего инструмента и обрабатываемого материала. Снижение показателя трения между ними ведет к увеличению износостойкости инструмента, а значит, увеличивает его срок службы и затраты на производство предприятия в целом.

Существует множество методов снижения характеристик трения. В их числе нанесение износостойкого покрытия на инструмент. В этом случае в качестве одного из составляющих пары трения выступает материал покрытия. В данной работе покрытие нанесли методом электроискрового легирования [1–6].

Интенсивность изнашивания инструмента при обработке резанием в первую очередь зависит от физических явлений при взаимодействии режущего инструмента с обрабатываемым материалом — задней поверхности инструмента с обрабатываемой заготовкой и передней его поверхности со сходящей стружкой. Характер этих явлений обуславливается как свойствами материалов инструмента и заготовки (химическим составом и состоянием, твердостью, прочностью, адгезионной способностью, взаимной растворимостью и др.) [7], так и условиями обработки (скоростью резания, наличием и видом охлаждения и др.). Среди контактных явлений, определяющих интенсивность изнашивания инструмента, важная роль принадлежит трению. Влияние трения на интенсивность изнашивания инструмента может быть непосредственным,

определяющим интенсивность так называемого абразивного изнашивания; опосредованным, определяющим интенсивность тепловыделения в зоне контакта и, следовательно, температуру в этой зоне, от которой в первую очередь зависит диффузионное изнашивание; непосредственно-опосредованным, влияющим на интенсивность адгезионного изнашивания как непосредственно, так и через температуру зоны контакта. При этом все три вида изнашивания имеют место одновременно, хотя в каждом конкретном случае в зависимости от конкретных условий обработки какой-то из них может быть преобладающим.

Для определения оптимальных областей применения того или иного покрытия рабочих поверхностей режущего инструмента для различных условий обработки проведены исследования влияния на трение в зоне контакта инструмента с заготовкой вида обрабатываемого материала, типа покрытия, скорости взаимного перемещения инструмента и заготовки, наличия искусственного охлаждения.

Исследования проводили на экспериментальной установке на базе токарно-винторезного станка фирмы RAMO, оснащенного установленной на суппорте тензометрической державкой, тензостанцией и регистрирующей аппаратурой. Схема установки приведена на рис. 1. В качестве материалов заготовки исследовали закаленную сталь марки 40ХГНМ, высокопрочный чугун марки ВЧ 40-10 и алюминиевый сплав АК5М2. В качестве инструментальных материалов исследовали

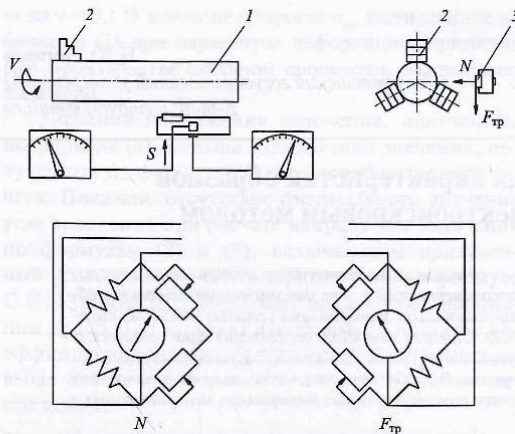


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

покрытия из безвольфрамовых твердых сплавов (ТС) 1 и 2, разработанных ИСМАН РАН (г. Черноголовка). Химический состав этих сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики упрочняющего электрода

Материал	Химический состав	Плотность, г/см ³	Твердость HRA	$\sigma_{\text{изг}}^1$, кг/мм ²
ТС1	79TiC-16Ni-5Mo	5,4...5,43	90,0...91,0	100...110
ТС2	TiC-Cr ₃ C ₂ -10Ni	5,37...5,38	92,5...93,0	90...100

Для исследования использовали образцы из закаленной стали с покрытиями, нанесенными методом электроискрового легирования на электроискровой установке "Элитрон-22А", а также из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия. Цилиндрическую заготовку 1 диаметром 100 мм закрепляли в кулачках 2 центрирующего патрона. Образцы 3 инструментального ма-

териала с размером площадки 30×10 мм устанавливали в резцедержателе станка. Тарирование системы выполняли с помощью гирь массой 2, 4, 6 и 8 кг в двух направлениях: силы нормального давления N и силы трения $F_{\text{тр}}$. Образцы перемещали с помощью механизма поперечной подачи станка. После начала контакта образца с вращающейся заготовкой включали рабочую поперечную подачу и измеряли силы N и $F_{\text{тр}}$. Значение силы N регулировали в пределах 100...300 Н. Коэффициент трения f определяли как отношение $F_{\text{тр}}/N$. Скорость перемещения заготовки относительно образца V задавали с помощью коробки скоростей станка в пределах 100...300 м/мин. Исследования проводили с применением смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и без охлаждения.

Средние значения f приведены в табл. 2. Для наглядности результаты экспериментов представлены на рис. 2, а...е. Проанализируем их.

На рис. 2, а видно, что увеличение скорости резания до 300 м/мин приводит к уменьшению коэффициентов трения. Наименьшие значения коэффициента трения по алюминиевому сплаву с охлаждением имеют образцы, упрочненные ТС1, затем ТС2, и худшие показатели у образцов из быстрорежущей стали без покрытия.

Из рис. 2, в следует, что коэффициенты трения при испытании образцов с покрытиями ТС1, ТС2 выше, чем у образцов из быстрорежущей стали без покрытия в паре со сталью с применением СОТС, что говорит о том, что для обработки заготовок из стали такой инструмент не может быть рекомендован.

При сравнении результатов испытаний на трение по чугуны с охлаждением образцов с покрытиями ТС1 и ТС2 и образцов из стали Р6М5 без покрытия установлено (рис. 2, д), что коэффициенты трения в паре ТС1 — чугун и ТС2 — чугун значительно ниже, чем в паре быстрорежущая сталь — чугун. При этом покрытие ТС1 предпочтительнее.

Таблица 2
Значения коэффициента трения при различных условиях обработки

Материал инструмента	V, м/мин	Обрабатываемый материал					
		Сталь		Чугун		Алюминиевый сплав	
		без охлаждения	с охлаждением	без охлаждения	с охлаждением	без охлаждения	с охлаждением
Р6М5	100	0,66	0,35	0,50	0,50	1,40	0,39
	200	0,55	0,18	0,40	0,29	1,36	0,24
	300	0,40	0,14	0,38	0,20	1,34	0,21
ТС1	100	0,80	0,36	0,75	0,29	0,85	0,30
	200	0,71	0,24	0,60	0,16	0,80	0,19
	300	0,69	0,23	0,56	0,12	0,76	0,16
ТС2	100	0,71	0,33	0,65	0,28	0,91	0,35
	200	0,60	0,22	0,50	0,15	0,80	0,21
	300	0,58	0,20	0,45	0,10	0,78	0,18

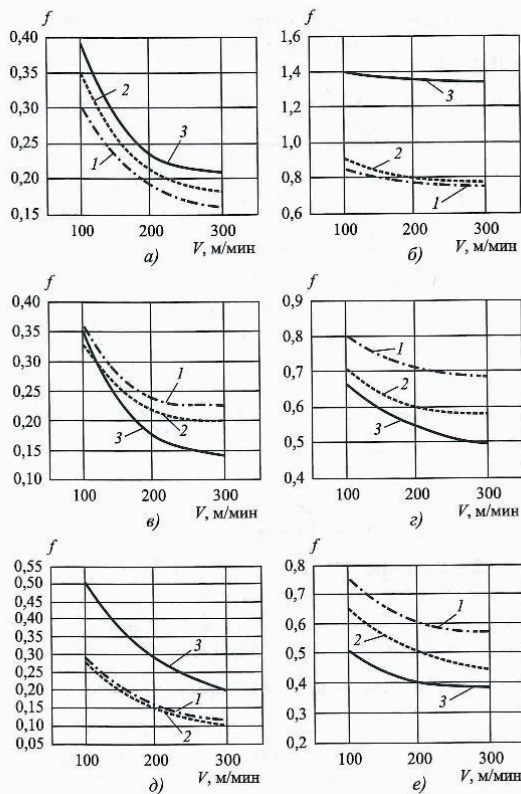


Рис. 2. Влияние скорости резания на коэффициент трения образцов, упрочненных ТС1 (1), ТС2 (2), и образцов из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия (3) в контакте с конструкционными материалами:

а — с алюминиевым сплавом с применением СОТС; б — с алюминиевым сплавом без СОТС; в — со сталью с СОТС; г — со сталью без СОТС; д — с чугуном с СОТС; е — с чугуном без СОТС

Из графиков, представленных на рис. 2, б, следует, что при испытаниях без СОТС коэффициенты трения образцов, упрочненных ТС1 и ТС2, значительно меньше, чем образцов из быстрорежущей стали. Это объясняется тем, что в контакте алюминий—железо наблюдается эвтектическое соединение, сопровождаемое прочными физико-химическими связями. Данное явление свидетельствует о нецелесообразности применения инструмента из быстрорежущих сталей при обработке алюминиевых заготовок. Меньший коэффициент трения показали образцы с покрытием ТС1.

Исследования коэффициентов трения образцов с покрытиями ТС1, ТС2 и образцов из быстрорежущей стали при взаимодействии со сталью без применения СОТС (рис. 2, г) показывают, что безвольфрамовые по-

крытия в температуронапряженных процессах уступают инструменту из быстрорежущей стали. Такой же эффект показали аналогичные испытания в паре с чугуном без применения СОТС (рис. 2, е). Это объясняется тем, что карбиды титана и карбиды хрома, составляющие основу безвольфрамовых сплавов, в условиях высокой температурной напряженности процессов имеют коэффициенты трения меньше, чем смесь карбидов железа и карбидов вольфрама, составляющих основу быстрорежущей стали. Следовательно, инструмент с безвольфрамовыми покрытиями нельзя рекомендовать для обработки стали и чугуна без охлаждения.

По результатам выполненных экспериментов сформулируем следующие **выводы**:

- 1) наименьшее значение коэффициента трения в контакте с алюминиевым сплавом при работе как с охлаждением, так и без него обеспечивает инструмент с покрытием ТС1, наибольшее — инструмент из быстрорежущей стали без покрытия;
- 2) наименьшее значение коэффициента трения в контакте со сталью при работе как с охлаждением, так и без него обеспечивает инструмент из быстрорежущей стали без покрытия, наибольший — инструмент с покрытием ТС1;
- 3) наименьшее значение коэффициента трения в контакте с чугуном при работе без охлаждения обеспечивает инструмент из быстрорежущей стали без покрытия, наибольший — инструмент с покрытием ТС1; при работе с охлаждением наименьший коэффициент трения в контакте с чугуном обеспечивает инструмент с покрытием ТС2, наибольший — Р6М5 без покрытия.

Таблица 3

Рекомендуемые материалы режущего инструмента для обработки различных конструкционных материалов

Наличие охлаждения	Обрабатываемый материал		
	Алюминиевый сплав	Сталь	Чугун
Без охлаждения	ТС1	Р6М5	Р6М5
С охлаждением	ТС1	Р6М5	ТС2

Исходя из этого можно предложить рекомендации для выбора оптимального материала режущего инструмента при обработке различных конструкционных материалов, представленные в табл. 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эффективность процесса электроискрового легирования (ЭИЛ) при поверхностном упрочнении стали 10 / А.Д. Верхотуров, А.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 13—20.
2. Логинов Н.Ю., Логинов Ю.Н., Худякова О.Ю. К вопросу моделирования процесса электроконтактного легирования // Металлообработка. 2004. № 6. С. 13—14.

3. **Логинов Н.Ю., Логинов Ю.Н.** Упрочнение инструмента методом электроконтактного легирования // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Вып. 1. Труды Междунар. юб. науч.-техн. конф. "Наука о резании материалов в современных условиях", посвященной 90-летию со дня рождения В.Ф. Боброва, 9—11 февраля 2005 г. Ч. 1. Тула, ТулГУ, 2005. С. 93—96.

4. **Логинов Н.Ю.** Увеличение ресурса режущего инструмента методом электроискрового легирования: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Тольятти, 2005. 140 с.

5. **Марков Р.С., Гнездилов С.С.** Опыт промышленного применения электроискрового легирования для упрочнения режущего инструмента // Повышение эффективности

работы горного оборудования при освоении месторождений полезных ископаемых: Сб. науч. тр. / под ред. А.В. Рилева, С.В. Медведева. Красноярск, ГАЦМиЗ, 1995. С. 56—61.

6. **Кузнецов И.С.** Расчетная оценка массопереноса при электроискровой обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. № 12. 2015. С. 41—44.

7. **Electrospark alloying of titanium and its alloys the physical, technological, and practical aspects.** P. I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance / V.V. Mikhailov, A.E. Gitlevich, A.I. Mikhailiuk et al. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013. No. 5. T. 49. P. 373—395.

УДК 621.9.025

В.П. Табаков, С.В. Сизов

(Ульяновский государственный технический университет)

E-mail: vpt1947@yandex.ru

Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия*

Представлены результаты исследований влияния состава многоэлементных покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия на их параметры структуры и механические свойства. Установлена эффективность режущего инструмента с разработанными покрытиями.

Ключевые слова: режущий инструмент, многоэлементное покрытие, химический состав, параметры структуры, механические свойства.

Results of researches of influence of structure of multielement coverings on the basis of nitrides of the titan, zirconium and niobium on parameters of structure and mechanical properties are provided. Efficiency of the cutting tool with developed coverings is established.

Keywords: cutting tool, multielement covering, chemical composition, parameters of structure, mechanical properties.

Введение

Нанесение износостойких покрытий на контактные площадки режущего инструмента — эффективный метод повышения его работоспособности [1, 2]. В настоящее время разработана широкая гамма однослойных и многослойных покрытий, обеспечивающих повышение работоспособности режущего инструмента [3—8]. Однако в ряде случаев эффективность такого инструмента недостаточна, что заставляет искать новые составы покрытий, обеспечивающие повышение эффективности.

Методика проведения исследований

Исследовали покрытия TiZrNbAlN , которые наносили на сменные многогранные пластины MC146, UTi20T и NTi10. Нанесение покрытий осуществляли на установ-

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-48-730246.

ке "Булат-6" с использованием катодов из титана, циркония, из сплава титана, ниобия и алюминия (TiNbAl), а также составных катодов из титана со вставками из циркония. Химический состав покрытий определяли методом количественного рентгеноспектрального анализа на установке MAP-4 с учетом ZAF-поправок. Параметры структуры покрытий (период кристаллической решетки a , полуширину рентгеновской дифракционной линии β_{111} , параметр текстурированности J_{111}/J_{200}) и остаточные сжимающие напряжения σ_0 исследовали на дифрактометре ДРОН-3М, относительную микродеформацию кристаллической решетки $\Delta a/a$ и размеры блоков областей когерентного рассеивания (ОКР) D рассчитывали по методике, приведенной в работе [9]. Микротвердость H_v , модуль упругости первого рода E и коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} покрытий определяли по методикам, изложенным в работе [10]. Интенсивность износа J твердосплавных пластин определяли при токарной обработке заготовок из стали 38ХГН (режим: $V = 150$ м/мин; $s = 0,17$ мм/об; $t = 0,5$ мм).

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области



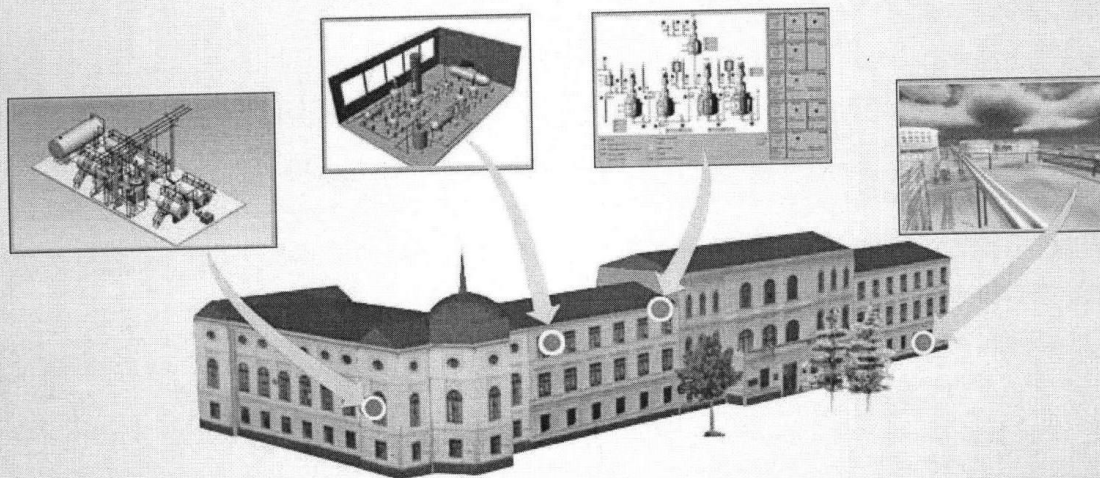
Всероссийский
Фестиваль
науки

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Выпуск 4, Том III

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 4, Volume III



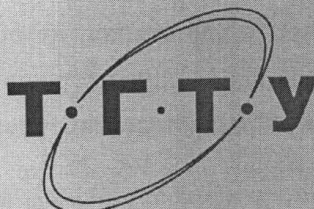
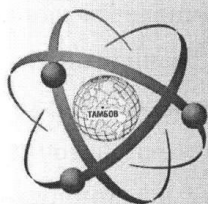
Тамбов

Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»

2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области



Всероссийский
Фестиваль
науки

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Материалы IV Международной научно-практической конференции

г. Тамбов, 15 – 17 ноября 2017 г.

Выпуск 4, Том III

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 4, Volume III

Научное электронное издание



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2017

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43
В52

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор В. А. Немтинов (общая редакция);
канд. техн. наук, профессор В. Г. Мокрозуб;
д-р техн. наук, профессор С. В. Карпушкин;
канд. экон. наук Ю. В. Немтинова;
канд. техн. наук, доцент А. Б. Борисенко;
канд. техн. наук С. В. Карпов

В52 Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн [Электронный ресурс] : материалы IV Международной научно-практической конференции : в 3 т. / под общ. ред. В. А. Немтинова ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – Вып. 4.
ISBN 978-5-8265-1836-6.

Т. III. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 120,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-1839-7.

Опубликованы материалы пленарных и секционных докладов Международной научно-практической конференции, которая посвящена проблемам научно-технического и социально-экономического развития регионов. Целью конференции является обсуждение и публикация научных достижений ученых, а также определение возможных путей решения проблем разработки методов и алгоритмов создания и применения виртуальных моделей и прототипов объектов различного назначения и сложности.

В настоящее время виртуальное моделирование и прототипирование технических систем широко используется при решении задач промышленного дизайна, проектирования, модернизации, перепрофилирования производств различных отраслей промышленности. Еще одна популярная сфера применения виртуального моделирования и прототипирования – создание моделей культурно-исторических объектов с целью сохранения первоначального облика памятников архитектуры, в том числе утраченных, мемориальных и культурных сооружений.

Материалы конференции могут быть полезны преподавателям вузов и средних учебных заведений, научным работникам, руководителям и специалистам предприятий, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

Все материалы прошли научное рецензирование.

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43

Материалы предоставлены в электронном варианте и сохраняют авторскую редакцию

ISBN 978-5-8265-1839-7 (т. III)
ISBN 978-5-8265-1836-6 (общ.)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2017

Секция VIII. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В ОБРАЗОВАНИИ	331
<i>Мартынов В. В., Филосова Е. И., Ширяев О. В., Плотникова В. К.</i> Автоматизация формирования динамических образовательных программ для машиностроения с учетом требований профессионального сообщества	332
<i>Абрамова Л. В., Бобыкин А. М.</i> Разработка информационной системы поддержки междисциплинарного курсового проекта для студентов вуза	338
<i>Левашкин Д. Г., Логинов Н. Ю., Козлов А. А., Гуляев В. А.</i> Образовательная модель проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в концепции Индустрия 4. 0	345
<i>Пучков Н. П., Протасов Д. Н., Урусов А. И.</i> Прототип функциональной модели адаптивной системы управления самообразованием	352
<i>Балабашина Ю. В.</i> Диагностика отдельных психологических характеристик творчески одаренной молодежи	356
<i>Костюкова Т. П., Лысенко И. А., Саубанов В. С.</i> Социальная ответственность профессорско-преподавательского состава образовательного учреждения как способ управления вузом	361
<i>Смыкова Н. В., Пятковский О. И., Звекон Н. А.</i> Оценка подготовки студентов в соответствии с профессиональными стандартами с использованием нейронных сетей	366
<i>Артамонов Ю. Н., Каманин И. О.</i> Метод анализа информационной значимости показателей	371
<i>Артамонов Ю. Н., Мелихов В. О.</i> Разработка системы прогнозирования развития наукоградов на основе модели динамических одномоментных уравнений	377

УДК 378.147.34

Левашкин Д. Г., Логинов Н. Ю., Козлов А. А., Гуляев В. А.
«Тольяттинский государственный университет»,
Россия, г. Тольятти,
(E-mail: LevashkinD@gmail.com)

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ
ПОДГОТОВКИ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ
В КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0**

Levashkin D. G., Loginov N. Yu., Kozlov A. A., Gulyaev V. A.
Togliatti State University, Russia, Tolyatti
(E-mail: LevashkinD@gmail.com)

**EDUCATIONAL MODEL OF PROJECT-ORIENTED TRAINING
OF YOUNG SPECIALISTS IN ENGINEERING AND TECHNICAL AREAS
IN THE INDUSTRY 4.0 CONCEPT**

Аннотация. Сегодня общество характеризуется растущим влиянием современных цифровых и интернет технологий, темпы развития которых, превосходят смежные технологичные, и нетехнологичные отрасли экономики, для которых они выступают уже в роли акселераторов развития. Переосмысление на рубеже 2005 – 2010 гг. понятий «производство» и «производственный процесс» привело к формированию концепции нового промышленного уклада – Индустрия 4.0. Ключевым фактором развития в условиях этой концепции является сокращение времени на подготовку и переоснащение производственных мощностей, наряду с возникновением острой дифференциации спроса на продукцию со стороны потребителей.

В этой связи остаются актуальными проблемы подготовки специалистов инженерно-технического профиля. Зачастую предприятия выходят с запросами на так называемые «проектные команды» – коллективы специалистов инженерно-технического профиля разных направлений. Такие команды способны в короткое время адаптироваться в новых условиях, выполнить подготовку проектного решения, владеют навыками работы с современными технологиями, могут проецировать текущую обстановку с учетом картины будущего.

В статье предложена образовательная модель подготовки команд молодых специалистов на основе реализации проектного подхода в процессе их обучения.

Ключевые слова: моделирование, проектная деятельность, Индустрия 4.0.

Abstract. Today, society is characterized by the growing influence of modern digital and Internet technologies, the development rates of which exceed the related technological and non-technological sectors of the economy, for which they are already playing the role of accelerators of development. Rethinking the concepts of “production” and “production process”

at the turn of 2005 – 2010 led to the formation of the a new concept of industrial development – Industry 4.0. The key factor in the development of this concept is the reduction in the time spent on preparation and re-equipment of production facilities, along with the emergence of a sharp differentiation of consumer demand for products.

In this regard, the problems of training specialists in the engineering and technical fields remain urgent. Often, enterprises come up with requests for so-called “project teams” of specialists in engineering and technical field. Such teams are able to adapt in new conditions in a short time, to work out the project solution, to have the skills to work with modern technologies, to project the current situation in the light of the future.

The article proposes an educational model for training of teams of young specialists based on the implementation of the project approach in the process of their training.

Keywords: modeling, project activity, Industry 4.0.

Введение. Внедрение концепции «Индустрия 4.0» тесно связывают с очередным этапом развития современного производства. Одним из аспектов создания такого производства (цифровое производство, производство технологически нового уклада) рассматривается широкое применение гибридных, комбинированных и аддитивных технологий в производственном процессе, уход от традиционных монотехнологий. Также заявлена разработка безлюдных производств, адаптивных производственных систем, автономных транспортных систем и комплексов [1 – 4].

Сдерживающими факторами являются отсутствие образовательных моделей ориентированных на подготовку молодых специалистов в комплексном подходе в рамках единого информационного и технологического потоков обмена и обработки информацией о состоянии производственного процесса [5 – 7]. А также ряд проблем связанных с кадровым обеспечением цифрового производства, отставание существующей структуры университетов осуществляющих соответствующую данной постановке подготовку инженерных кадров [8 – 10].

Предлагаемая модель рассматривает создание условий для подготовки команд молодых специалистов, способных в обозримом будущем самостоятельно развиваться профессионально, адаптироваться к новым вызовам опережающего развития общества, заниматься инжинирингом перспективных производственных систем, созданием и обслуживанием интеллектуальных цифровых систем управления производством.

Принципиальное построение образовательной модели. Целью создания образовательной модели является не преобразование основ и процессов образовательного процесса, а трансформация самой концепции инженерной подготовки, создание предпосылок для формирования принципиально нового подхода к инженерному образованию, актуальному вызовам глобального рынка сегодня, востребованному для предприятий в будущем.

Апробация предлагаемой модели (см. рис. 1) образовательного процесса, обеспечит непрерывное формирование компетенций студентов применительно к решению перспективных производственных задач, связанных с инжинирингом конструкций, технологий, материалов, востребованных в ближайшие 5 – 10 лет или обозримом будущем.

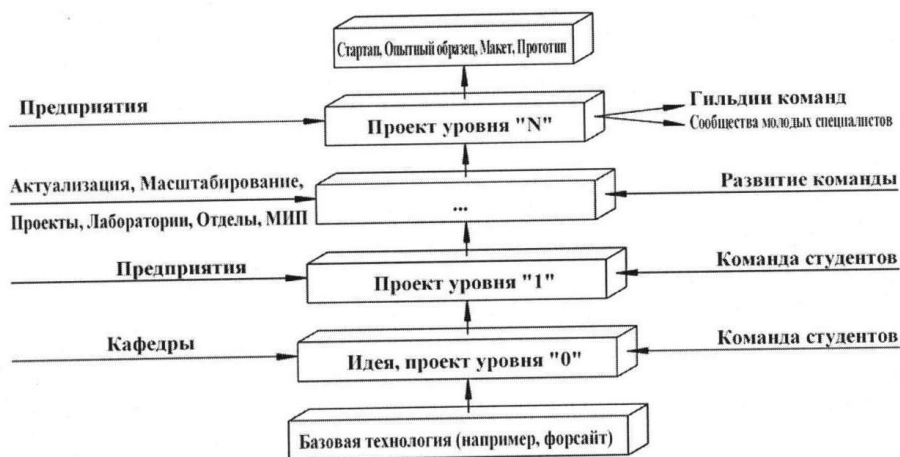


Рис. 1. Блок-схема образовательной модели

Через развернутую и актуализируемую тематику проектов обеспечивается непрерывная привязка большего числа студентов к проектам тематической направленности, подпитка студенческих команд старших курсов новыми кадрами и молодежью младших курсов [1 – 4].

В процессе выполнения проекта, на начальных его этапах, обеспечивается совместная работа кафедр и студенческих проектов. На завершающих этапах в работу включается сеть отделов и лабораторий университета. Кооперация с ними обеспечивает студенческий проект на стадии завершения отработкой сформированного в рамках проекта технического решения, его доводке до стадии «Опытный образец», «Макет» или «Прототип».

В качестве основных эффектов мероприятий модели ожидается увеличение спроса на выпускников и поднятие престижа инженерно-технических направлений подготовки в регионе.

Методика исследования. Реализация модели опирается на набор технологий позволяющих выполнить анализ трендов актуальных как в ближней, так и далекой перспективе будущего и представляет собой набор мероприятий выстроенных в логичной последовательности. В работе приведены результаты апробации модели с применением технологии форсайта.

На первом этапе в процессе обработки трендов студенты, разбившись на команды, формируют облик будущего, определяют векторы развития производства в будущем, технологии востребованные обществом в перспективе, формированием общественной среды [11]. Следующий этап направлен на формирование у команды ключевой идеи, а затем проекта актуального в будущем (проект нулевого уровня). Далее, рассматривая роль каждого участника, командам предлагается подготовить паспорт проекта, распи-

сать необходимые мероприятия, ресурсы проекта. Проектные команды имеют возможность доработать проекты до первого, второго и т.д. уровней, с учетом полученных знаний при обучении, тем самым развивая проект [12, 13]. Результатом реализации образовательной модели является совместная работа кафедр и студенческих команд, на завершающих этапах в работу могут включаться предприятия [14]. Кооперация с ними, обеспечивает студенческий проект отработкой сформированного готового технического решения.

Результаты апробации. В процессе апробации модели одной из студенческих команд из состава инженерных групп был реализован проект создания функциональной модели манипулятора (рис. 2) [15, 16]. По результатам апробации (рис. 3) была подготовлена функциональная модель манипулятора.

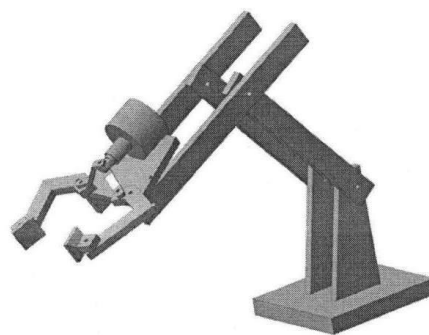


Рис. 2. Модель манипулятора

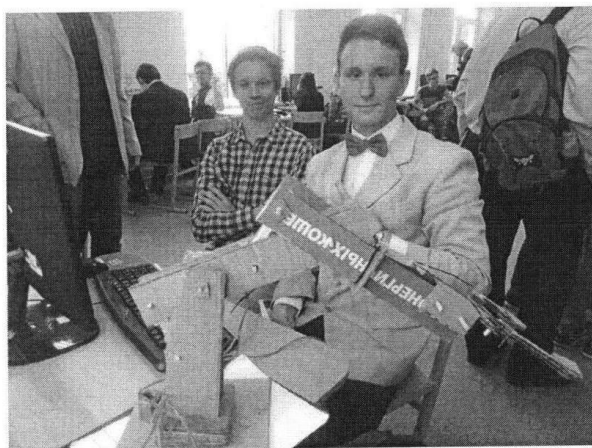


Рис. 3. Апробация модели манипулятора, проект команды «Craft-Machine»

По результатам применения образовательной модели можно заключить, что уже на первом курсе студенты демонстрируют достаточные компетенции для «входа» на первый этап проектной деятельности – сформулировать идею и реализовать свой проект.

Студенты с большим энтузиазмом воплощают собственные инициативы и учатся рационально планировать работу и распределять обязанности по ее выполнению среди участников своей команды, в подходе формирования работы с выходом «на результат».

Выводы. Как показали результаты апробации образовательной модели уже на первом этапе реализации проектов нулевого уровня обеспечивается следующее:

- 1) возможность организовать проектные площадки и взаимодействие с городским сообществом. У ребят появляется возможность поговорить на тему «будущего» их профессии, осознать свою значимость в будущем.
- 2) методическая возможность поработать непосредственно с интеллектом каждого участника команды, как на этапах выработки идей для востребованных проектов, так и на этапах непосредственно реализации проекта, при этом нет необходимости закладывать определенные профессиональные компетенции студентам заранее.
- 3) возможность сформировать эффективную академическую среду в университетах. С первых дней обучения привить студентам командный подход при решении сложных задач, дать возможность студентам осознать личностную роль и влияние каждого члена команды на проектный результат.

Список использованных источников

1. **Палеева, М. Л.** Проектная деятельность как фактор формирования профессиональной компетентности бакалавров технических направлений / М. Л. Палеева, Т. А. Соколова, Л. С. Цубикова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 2(85). – С. 297 – 301.
2. **Автухова, А. Т.** Вовлечение студентов младших курсов в проектную деятельность / А. Т. Автухова, М. Н. Арасланова, Н. Б. Кубикова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5–6. – С. 1298 – 1301.
3. **Хасанова, Г. Ф.** Групповая проектная деятельность студентов как средство подготовки инновационных инженеров в исследовательском университете / Г. Ф. Хасанова, Ф. Т. Шагеева, В. Г. Иванов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 23. – С. 489 – 492.
4. **Helfert, M.** Student projects and virtual collaboration in IT degrees: Incorporating entrepreneurship into study programmes / M. Helfert, I. Lyutak, H. Duncan // International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals. – 2017. – № 8(4). – P. 14 – 26.
5. **Saritas, O.** The evolution of the use of foresight methods: a scientometric analysis of global fta research output / O. Saritas, S. Burmaoglu // Scientometrics. – 2015. – V. 105. – № 1. – P. 497 – 508.

6. **Kaivo-oja, J.** Towards better participatory processes in technology foresight: how to link participatory foresight research to the methodological machinery of qualitative research and phenomenology? / J. Kaivo-oja // *Futures*. – 2017. – V. 86. – P. 94 – 106.
7. **Smart university** / V. L. Uskov, J. P. Bakken, S. Karri et al. // *Conceptual modeling and systems design*. – 2018.
8. **Consolidated** optimization algorithm for resource-constrained project scheduling problems / S. Elsayed, R. Sarker, T. Ray, C. C. Coello // *Information Sciences*. – 2017. – P. 418–419, 346 – 362.
9. **Atli, O.** Resource-constrained project scheduling problem with multiple execution modes and fuzzy/crisp activity durations / O. Atli, C. Kahraman // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. – 2014. – V. 26, № 4. – P. 2001 – 2020.
10. **Dovleac, R.** Quality management techniques embedded in agile project development / R. Dovleac, A. Ionică // *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*. – 2017. – P. 121.
11. **Maltseva, A. A.** Vision of the future of scientific and technical clubs on the university platform / A. A. Maltseva, I. D. Lelchitskiy // *The results of foresight session. Integration of Education*. – 2017. – № 21(2). – P. 262 – 285.
12. **Gattringer, R.** The challenge of partner selection in collaborative foresight projects / R. Gattringer, M. Wiener, F. Strehl // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2017. – 120. – P. 298 – 310.
13. **Santos, C.** A methodology for the identification of strategic technological competences: An application in the sheet metal equipment industry / C. Santos, M. Araújo, N. Correia // *Futures*. – 2017. – 90. – P. 31 – 45.
14. **Duse, C. S.** How important is mentoring in education? / C. S. Duse, D. M. Duse, M. Karkowska // *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*. – 2017. – 121.
15. **Use of training** programs based on gaming platforms for improving the effectiveness of education / E. V. Soboleva, A. N. Sokolova, N. I. Isupova, T. N. Suvorova // *Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin*. – 2017. – № 7(4). – P. 7 – 25.
16. **Quality assurance** as internal mechanism of increasing the competitiveness of the higher education institution in the context of international integration. Indian / D. T. Dugarova, S. E. Starostina, T. S. Bazarova, V. I. Vaganova, G. N. Fomitskaya // *Journal of Science and Technology*. – 2016. – № 9(47).

References

1. **Paleeva, M. L.** Project activity as a factor in the formation of professional competence of bachelors of engineering directions / M. L. Paleeva, T. A. Sokolova, L. S. Subikova // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. – 2014. – № 2(85). – P. 297 – 301.
2. **Autukhova, A. T.** Involvement of undergraduate students in project activities / A. T. Autukhova, M. N. Araslanov, N. B. Kubikova // *Fundamental research*. – 2014. – № 5-6. – P. 1298 – 1301.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, РЕШЕНИЯ

Материалы I Всероссийской научной конференции в двух частях. Часть первая.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В МОДЕЛИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, РЕШЕНИЯ

Материалы I Всероссийской научной конференции
в двух частях

Часть 1

ISBN 978-5-6040503-8-5



9 785604 050385

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В МОДЕЛИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ:
ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, РЕШЕНИЯ**

*Материалы
I Всероссийской научной конференции*

В двух частях

Часть 1



Тольятти
2017

УДК 001:004
ББК 72.5
И741

Информационные технологии в моделировании и управлении:
И741 **подходы, методы, решения** : Сборник научных статей I Всероссийской научной конференции : 12-14 декабря 2017 г. В двух частях. – Тольятти : Издатель Качалин Александр Васильевич, 2017.

ISBN 978-5-6040503-7-8

Часть 1 : Материалы секций I, II. – 494 с.

ISBN 978-5-6040503-8-5

В авторской редакции.

В сборнике представлены материалы по проблемам междисциплинарных исследований в области математики, теоретической и прикладной информатики в естествознании, экономики, технических системах и гуманитарной сферы.

Цель сборника – обмен идеями, обсуждения достижений, интеграция научных знаний и практики, а также определение актуальных и перспективных направлений научных исследований и практических разработок.

Сборник адресован научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам различных специальностей.

УДК 001:004
ББК 72.5

ISBN 978-5-6040503-8-5 (ч. 1)
ISBN 978-5-6040503-7-8

© Авторы статей, 2017
© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2017

Г.С. Евдокимова АНАЛИЗ ДАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ СТАТИСТИКИ.....	92
Д.П. Журов, О.А. Гресс, Д.Н. Сидоров ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ НА ЧЕРЕНКОВСКОЙ КАМЕРЕ ТЕЛЕСКОПА TAIGA-1АСТ ПО СНИМКАМ С ССD-КАМЕРЫ.....	100
А.Г.Ионис, Ж.Б.Розанова, А.Д.Турутина ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕКТОРА ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ РФ.....	110
Е.С. Каган, Е. В. Гоосен, С. Г. Гутова, К. С. Саблин РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ РЕСУРСНЫХ РЕГИОНОВ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ ВЫВОДОВ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА.....	117
Е.С. Каган, Е.С. Чернова ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ В ГОРОДСКИХ ОКРУГАХ И МУНИЦИПАЛЬНЫХ РАЙОНАХ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ.....	125
Л.Я.Козак, А.К. Дивичук ПОСТРОЕНИЕ КВАДРАТИЧНОЙ МОДЕЛИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНОГО БАЛАНСА.....	132
А.А. Коннова, Н.Ю. Логинов, А.А. Козлов СПЕЦИФИКА ФРЕЗЕРОВАНИЯ УГЛОВЫХ УЧАСТКОВ ПУАНСОНОВ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ.....	139
С.Ю. Корабельщикова, И.В Попович, Е.П Сысоева О ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОДНОЗНАЧНО ДЕКОДИРУЕМЫХ КОДОВ.....	144
Н.В.Коряковская, Ф.А.Венедиктов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	151
К.В. Красюкова, Н.М. Кузьмин ПРОСТОЙ ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ ОКРАСКИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ.....	160
Л.В. Кремлева, В.А. Слуцков, Н.А. Онегина ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ФРЕЗ ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ.....	165
В.С. Кривошеева ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕСТУПНОСТИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ.....	171

УДК 621.9

А.А. Коннова¹, Н.Ю. Логинов², А.А. Козлов³

СПЕЦИФИКА ФРЕЗЕРОВАНИЯ УГЛОВЫХ УЧАСТКОВ ПУАНСОНОВ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

Тольяттинский государственный университет

(Россия, Тольятти, ¹rsi-tgu@tltsu.ru, ²loginovnik@mail.ru, ³k.a.a80@bk.ru)

Аннотация. Назначение режимов резания при фрезеровании концевыми фрезами плоскостей ведется по эмпирическим зависимостям, представленным во многих литературных источниках. В результате этого расчета получают максимально производительные режимы для минимизации машинного времени обработки. Это связано с экономическими затратами на производство. При обработке угловых участков пуансонов и пресс-форм возникает сложность в этих расчетах в связи с непрямолинейностью траектории движения инструмента и изменением толщины снимаемого слоя. В случае обработки на станках с числовым программным управлением этот факт должен отражаться в управляющей программе. В статье рассмотрена математическая модель обработки таких мест. Выделены четыре основных участка, в которых возникают разные условия резания. Проведены расчеты изменения толщины снятия припуска и даны практические рекомендации для корректировки режимов обработки при фрезеровании угловых участков штамповой оснастки.

Ключевые слова: фрезерование, концевая фреза, пресс-форма, пуансон.

A.A. Konnova¹, N.Y. Loginov², A.A. Kozlov³

THE SPECIFICS OF MILLING, THE CORNER SECTIONS OF THE PUNCHES END MILLS

Togliatti State University

(Russia, Togliatti, ¹rsi-tgu@tltsu.ru, ²loginovnik@mail.ru, ³k.a.a80@bk.ru))

Abstract. The purpose of cutting in end milling of planes is conducted by the empirical dependences presented in many literary sources. The result of this calculation get the most productive modes to minimize primary processing time. This is due to the economic costs of production. When machining corner areas of punches and press-forms, the difficulty arises in these calculations in connection with the curvature of the trajectory of the tool and change the thickness of the processed layer. In the case of machining with numerical control, this fact should be reflected in the control program. The article considers the mathematical model of the processing of such places. Highlighted four main areas where there are different cutting conditions. The calculations of the thickness change of the stock removing, and practical recommendations for the adjustment of the processing modes milling angular plots of die tooling.

Keywords: milling, end mill, mold, punch.

Одним из основных направлений фрезерной обработки является изготовление пуансонов, пресс-форм и штампов. [1, 2] Обработке прямолинейных участков посвящено много литературы и этот случай достаточно подробно изучен. Сложность вызывает обработка криволинейного контура. В частности фрезерование углового участка. Это объясняется увеличением объема срезаемого материала, что влечет за собой увеличение сил резания, действующих на инструмент, износ фрезы, снижению точности обработки и качества обработанной поверхности. [3]

В процессе обработки пуансона выделяются четыре различных режима работы инструмента:

- 1) обработка прямолинейного участка;
- 2) заход фрезы в угол;
- 3) обработка углового участка;
- 4) выход из углового участка.

При заходе фрезы в угловой участок значительно увеличивается площадь контакта инструмента и заготовки. Это влияет на износ инструмента и режим фрезерования.

Сформулируем техническое противоречие: фрезерование – это сложный процесс, при котором уменьшение времени обработки, повышение качества и точности обрабатываемого изделия, а также снижение износа режущего инструмента является сложной задачей. [4] Однако, в то же время, задача является наиболее приоритетной, в связи с потенциально высоким экономическим эффектом, оказывающим влияние на снижение себестоимости производимых изделий, уменьшение длительности производственного цикла, продление времени нахождения режущего инструмента в исправном состоянии без переточки, а оборудования - без переналадки. Также возникает снижение напряженности труда, если обработка ведется не на станках, оснащённых системами ЧПУ. [5]

Возникает идея, тем или иным образом изменить параметры режима резания при переходе от прямолинейного участка к угловому.

При этом лимитирующий показатель – это площадь контакта системы «заготовка – инструмент».

Рассмотрим случай, когда фреза обрабатывает внутренний угол (рис. 1).

На рисунке жирной линией выделена дуга контакта фрезы с обрабатываемой деталью. Она зависит от глубины резания t и радиуса инструмента R . Размером r обозначен радиус кривизны обрабатываемого угла.

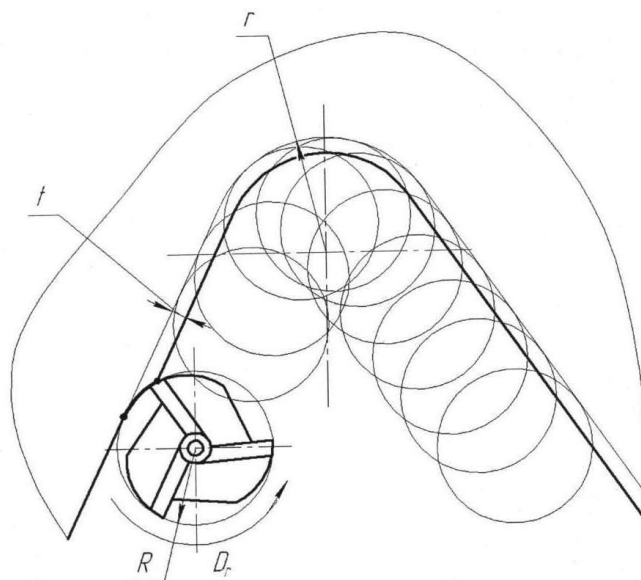


Рис. 1. Фрезерование внутреннего угла пуансона

На рисунке 2 представлена схема прохождения этого фрезой углового участка.

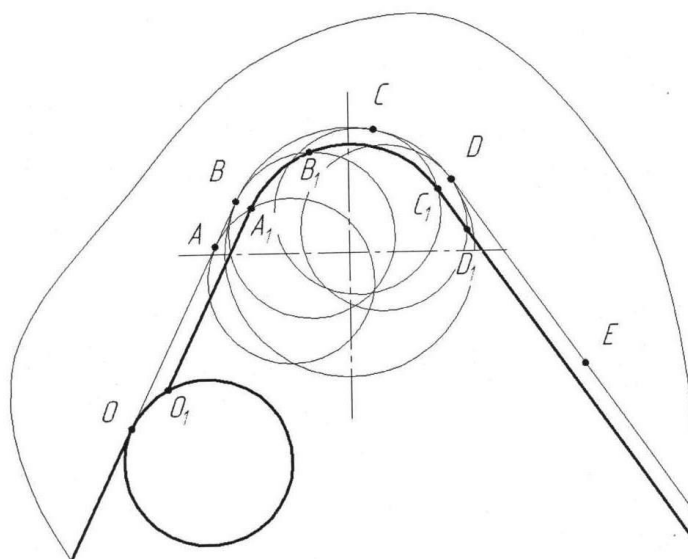


Рис. 2. Схема прохождения этого фрезой углового участка

Modeling of tribological characteristics of specimens with wear-resistant coating using dummy variables

Loginov, N.^{1,a}, Khudyakova, O.^{2,b} Orlova, E.^{3,c}

¹PhD (Technical science), Associate Professor, Department of equipment and technologies of mechanical production, Togliatti State University, Russia

²PhD (Technical science), Associate Professor, Department of World Economy Diplomatic Academy of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Russia

³PhD (Technical science), Associate Professor, Department of Natural and humanitarian sciences "Kotelniki" Branch of Dubna University, Russia

^aloginovnik@mail.ru, ^bhudyakova.olgs@mail.ru, ^corlova.lenok@mail.ru

Keywords: Manufacturing process modelling, coefficient of friction, dummy variables, wear-resistance.

Abstract. In the process of machining, one of the main factors affecting machining tool wear is friction. A decrease in the coefficient of friction between the machining tool and a machined part is a key challenge for researchers. One of the methods to decrease the coefficient of friction and, consequently, to improve the endurance of the tool is the application of wear-resistant coatings. In the current study, modelling of triboprocesses using dummy variables is proposed. Since a peculiarity of modelling of manufacturing processes is a presence of a large number of quality parameters, the influence of all key parameters on the value of the coefficient of friction has been analysed. Also, an adequate model of the dependence of the conditions of the manufacturing process on the coefficient of friction has been developed. The results of the model are important not only for analysis of friction between contact surfaces itself, but also as supplementary and qualitative estimation of different manufacturing processes.

Introduction

In the scope of the current work, it is proposed to use dummy variables for an assessment of a large number of attributive factors characterising friction. It is impossible to describe adequately any manufacturing process without the dummy variables; they enable to improve the quality of modelling and prediction.

The dynamics of the coefficient of friction itself can be successfully modelled using correlation and regression analysis. This representation is applied in case of dynamic change of friction environment, i.e. the parameters can be described by smooth functions. However, the majority of parameters characterising this process changes abruptly and, therefore, can be described only by dummy variables.

Motivation, scientific importance and literature review. Investigation of features of the deformation and rupture of surface layers is of utmost importance for analysis of processes related to the interaction between contact surfaces and, in particular, friction between a machining tool and material under treatment. Principal information for research about these processes can be received only from experiments. However, complexity of such processes and the presence of multiple factors prevents from obtaining unequivocal relationship between structural characteristics of the inputs and outputs of the experiments. Therefore, in order to estimate the trend of this (functional) relationship, it seems effective to use an econometric apparatus.

There are a number of scientific papers related to the analysis of the process of friction. Particularly, experimental analysis of the coefficient of friction is present in [1]. Some researchers, [2], propose the modelling of friction using finite element analysis, and others, [3],

model seam welding process by ANSYS Multiphysics, a finite element package. Another article, [4], presents a multilevel analysis of friction with wear and tear that combines cellular automata modelling on a scale of local contacts together with phenomenological (macroscopic) theory of friction. A simulation model of high-speed friction and wear and tear based on the assessment of thermal and force interaction of a contact pair and also damage and melting of material at the contact zone is described in [5]. Friction is modelled as a process of diffusion via molecular dynamics in [6]. An approach of building elementary thermophysical models of friction and accentuating only one factor in each model is proposed for modelling of inert material heating by external friction in [7]. It is recommended to use dimensionless parameters for the investigation of the dependency of the coefficient of rolling friction on material characteristics and loading in [8]. The application of binary variables for high-quality modelling of systems describing diffusion processes are shown in [9-13]. All approaches satisfy the requirements and objectives of their problems within the framework of conducted experiments.

From our prospective, the use of the econometric apparatus, which is proposed in this study, has greater applicability than the aforementioned approaches. Furthermore, this method allows transforming a model to almost any particular condition of an experiment or numerical analysis.

Identification of objectives. The process of the interaction of a machining tool with the material under treatment can be described as the following: the machining tool which has greater hardness than a work part acts upon the work part and cuts away a surface layer of the work part. Thus, the cut layer is pulled out from the cutting zone as chippings.

In order to improve the hardness of the tool manufactured from chisel steel, it is proposed to apply carbide material on the cutting surface of the tool by electro spark deposition (ESD) [14-17].

For this study, three common engineering materials for the work part are selected: aluminium alloy AK5M2, steel 40KhGNM, and high-strength cast iron VCh40-10. The characteristics of the carbide material that is applied on the machining tool, produced from high-speed tool steel R6M5, are presented in Table 1

Table 1 - Electrode characteristics

Electrode type	Electrode chemical composition	Density, [g/sm ³]	Hardness, [HRA]	$\sigma_{Bending}$, [kg/mm ²]
STIM-2	79TiC-16Ni-5Mo	5.4-5.43	90.0-91.0	100-110
STIM-3	TiC-Cr3C2-10Ni	5.37-5.38	92.5-93.0	90-100

Hence, it is reasonable to optimize the parameters of the process to reduce the wear and tear of the machining tool or/and to improve the quality of the investigated process. A principal parameter for our analysis in this case is the value of the coefficient of friction depending on experiment conditions [18,19].

Identification of experimental conditions. All experiments have been conducted on a special machine presented in Figure 2 that consists of a lathe, a strain gauge holder with a fixed specimen, a strain gauge station, and recording equipment. Figure 1 also shows a diagram of strain gauges connection.

The coating of the carbide materials STIM-2 and STIM-3 was applied on the high-speed steel specimens by electro spark deposition using electro spark machine ELITRON-22A on different

modes. A beam with strain gauges was fixed by special bushings that were mounted in a machine blade holder [14].

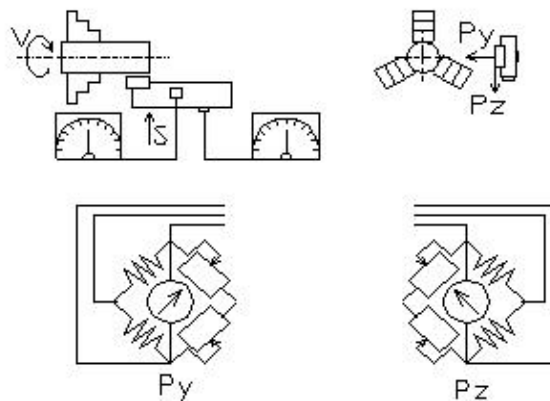


Fig. 1. A special machine for friction testing

After conducting all experiments, it is necessary to process results obtained within the proposed approach. The value of the coefficient of friction is analysed for all carried out experiments. As input data, the following conditions are compared: cutting velocities are 100, 200 and 300 m/min; the materials of the work part are aluminium, steel and cast iron; the materials of the tool are covered by STIM-2, STIM-3, and without any coating, i.e. ordinary high-speed steel; the modes of electro spark deposition are 1, 2, and 3 which corresponds to the following voltages of the electro spark machine: 50 V, 100 V, and 150 V, respectively; presence and absence of lubricant coolant [14,20,21].

Dynamics of the coefficient of friction. Let us set the following notation: the resultant factor Y stands for the coefficient of friction, the factor coefficients $x_1, x_2, x_3, x_4,$ and x_5 that define the cutting velocity, the work part, the tool material, the mode of electro spark deposition, and the presence of the lubricant coolant, respectively. Since the factor coefficients x_2-x_5 are quality parameters, they are included in the model as dummy parameters. Among them, the coefficients x_2-x_4 have three gradations each; therefore, they are described by two binary variables, e.g. x_2 is represented by z_{21} and z_{22} , whereas the coefficient x_5 has only two gradations, so it can be described by one binary variable. The values of all dummy variables are shown in Table 2.

Table 2 - Dummy variables and the corresponding binary variables

Dummy variable	Binary variables, corresponding to the dummy variable		Gradations for the binary variables
X_2	Z_{21}	Z_{22}	$z_{21}=1, z_{22}=0$ for aluminium work part $z_{21}=0, z_{22}=1$ for steel work part $z_{21}=0, z_{22}=0$ for cast iron work part
X_3	Z_{31}	Z_{32}	$z_{31}=1, z_{32}=0$ for STIM-2 tool coating $z_{31}=0, z_{32}=1$ for STIM-3 tool coating $z_{31}=0, z_{32}=0$ for tool material R6M5 without any coating
X_4	Z_{41}	Z_{42}	$z_{41}=1, z_{42}=0$ for mode 3 $z_{41}=0, z_{42}=1$ for mode 2 $z_{41}=0, z_{42}=0$ for mode 1
X_5	Z_5		$z_5=1$ for presence of coolant lubricant $z_5=0$ for absence of coolant lubricant

For the analysis of two-way influence between all possible pairs of coefficients, correlation analysis is performed and a correlation matrix is built, Table 3.

Table 3 – A correlation matrix for analysing coefficients

	Y	x_1	z_{21}	z_{22}	z_{31}	z_{32}	z_{41}	z_{42}	z_5
Y	1								
x_1	-0.20	1							
z_{21}	0.34	0	1						
z_{22}	-0.10	0	-0.5	1					
z_{31}	0.01	0	-4.6×10^{-18}	-4.6×10^{-18}	1				
z_{32}	-0.11	0	-4.6×10^{-18}	1.39×10^{-17}	-0.5	1			
z_{41}	-0.20	0	8.78×10^{-18}	-0.32	0.63	-0.32	1		
z_{42}	0.06	0	4.36×10^{-18}	0.24	2.18×10^{-17}	0.71	-0.45	1	
z_5	-0.77	0	3.05×10^{-17}	-4.4×10^{-18}	3.05×10^{-17}	-4.4×10^{-18}	0.15	-0.11	1

For the analysis of sampling significance for the correlation coefficients, Student's t -test is used. The analysis shows that the coefficient of friction is affected mostly by the coefficient indicating the presence of coolant lubricant, z_5 , whereas the coefficient standing for a work part made of steel has a low impact on Y and all other coefficients influence Y insignificantly. It is interesting to mention the fact that various gradations of some coefficients affect the coefficient of friction differently, i.e. one gradation can lead to positive correlation whereas another gradation of the same coefficient causes negative correlation.

According to the Farrar-Glauber test (F-G test), the intercorrelation matrix demonstrates multicollinearity; in particular, coefficients z_{32} , STIM-3 tool material, and z_{41} , mode 3, are linearly predicted from each other. This is reasonable from engineering point of view; however, from the point of view of econometric analysis, it implies that those two coefficients cannot be included in the model simultaneously.

The function of the coefficient of friction from the conditions of the experiments with dummy variables is the following (standard errors of the coefficients are shown in the brackets):

$$Y = 0.833 - 0.001x_1 + 0.239z_{21} + 0.027z_{22} + 0.110z_{31} - 0.202z_{41} - 0.089z_{42} - 0.478z_5.$$

(1)

$$(0.077) \quad (0.000) \quad (0.056) \quad (0.062) \quad (0.070) \quad (0.104) \quad (0.054) \quad (0.045)$$

Practical relevance of the study, recommendations and implementation results. It is noteworthy that the developed model is adequate for the majority of goodness of fit tests: F-test, the coefficient of determination, and the average approximation error, see Table 4.

Table 4 – Analysis of model adequacy by different criteria

Corrected coefficient of determination	F-test	t-test	Average approximation error	Average elasticity coefficient
$R^2 = 0.721$ $R^2_{crit} = 0.5$	$F = 22.86$ $F_{crit}(0.05; 8.45) = 2.15$	$t_0 = 10.79$ $t_1 = -2.84$ $t_{21} = 4.26$ $t_{22} = 0.43$ $t_{31} = 1.57$ $t_{41} = -1.94$ $t_{42} = -1.64$ $t_5 = -10.55$ $t_{crit}(0.05; 52) = 2.01$	$A_{cp} = 8.57\%$ $A_{crit} = 10\%$	$E_1 = -0.32$ $E_{21} = 0.16$ $E_{22} = 0.02$ $E_{31} = 0.08$ $E_{41} = -0.07$ $E_{42} = -0.09$ $E_5 = -0.49$

A high coefficient of determination leads to a good-quality model; in our case, 72.1% of the variance of the coefficient of friction is described by the developed model; the equation of regression is all in all meaningful, and the average approximation error is acceptable. The only one parameter that does not satisfy t-test is the binary variable z_{22} ; the variables z_{31} and z_{42} satisfy t-test for our purpose yet not completely, and the other variables satisfy this criterion unconditionally. The model is not elastic for any single coefficient yet it does not belittle its advantages. The obtained results do not contradict a current engineering vision of the dependency of the coefficient of friction from the conditions of the experiment. Hence, the developed model of the dynamics of the coefficient of friction allows analysing the contribution of each parameter on the result collectively and discretely and also predict the result within the analysed cutting modes.

The last step is to interpret the coefficient of the developed model since they characterise the contribution of each parameter on the value of the coefficient of friction: by increasing in the cutting velocity by 100 m/min reduces on average the coefficient of friction by 0.08; for an aluminium work part, the coefficient of friction increases by 0.239, whereas, for a steel work part, the increase is only 0.027; the use of STIM-2 as tool coating leads to the growth of the coefficient of friction by 0.110; a switch of electro spark deposition to mode 3 causes a drop in the coefficient of friction by 0.202, while mode 2 decreases it just by 0.089; presence of the lubricant coolant is the most efficient method of reducing the coefficient of friction (by 0.478 on average).

The obtained (modelled) values of the change of the coefficient of friction correspond to existing results of the experiments.

A significant positive effect of the current modelling is the incorporation of a big number of parameters of the analysed process (experiment conditions).

It is evident that an analogical econometric analysis can be developed for other modes of electro spark deposition and with greater number of input parameters or experiment conditions and each time the model will have unique features.

Conclusions. The developed econometric model with included dummy variables demonstrates the capabilities of the econometric analysis. This approach allows investigate the dynamics of the cutting process comprehensively and in details, in particular, while solving a problem of prioritising experiment conditions which is crucial from a practical point of view. Furthermore, the use of multiple factor analysis enables modelling explicitly and adequately the process of interaction between bodies in contact which is of utmost importance for consistent analysis of dynamic friction problems because it allows taking into consideration each experiment condition. Also, a significant outcome of this study is the determination of coefficients characterising the impact of each factor on the result separately and an opportunity of ranking the factors by the level of its impact on the outcome variable. From the performed analysis, it is clear that the main factor influencing the value of the coefficient of friction is the presence or absence of lubricant coolant.

References

- [1] A.E. Shirokov, V.G. Experimental investigation of the coefficient of friction. Scientific bulletin of Omsk. 1 (2014) 143-147. [in Russian]
- [2] V.P. Kuznetsov, I.Yu. Smolin, A.I. Dmitriev, D.A. Kononov, A.V. Makarov, A.E. Kiryakov and A.S. Yurovskikh, Finite element simulation of nanostructuring burnishing. Physical mesomechanics 14 (2011) 87-97. [in Russian]
- [3] A.T. Bikmeev, R.K. Gazizov, V.Yu. Ivanov, A.A. Kasatkin, V.V. Latysh, S.Yu. Lukashchuk, I.Sh. Nasibullaev, K.R. Yulmuhametov, A.M. Yamileva, Analysis of parallelization efficiency of the Ansys multiphysics in simulation of linear friction welding. Bulletin of the South Ural State University, 25 (2011) 64-75. [in Russian]
- [4] A.I. Dmitriev, A.Yu. Smolin, V.L. Popov, S.G. Psakhie, Multilevel simulation of friction and wear using numerical methods of discrete mechanics and phenomenological theory. Physical mesomechanics 11 (2008) 15-24 [in Russian]
- [5] G.V. Lepesh, Simulation of high friction and wear. Technico-technologicheskii problem sevisa 3 (2013) 35-42. [in Russian]
- [6] P.I. Malenko, Study and implementing of molecular dynamics method on the diffusion processes under sliding friction with lifetime lubrication in surface layers of the nitrocarburized heat-resisting steels. Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering Industry". 3 (2014) 22-29. [in Russian]
- [7] A.P. Amosov, Elemental thermal models of friction. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. vol 13 3 (2011) 656-662. [in Russian]
- [8] V.L. Popov, S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.I. Dmitriev, K. Knothe, F. Bucher, M. Ertz, Friction coefficient in "rail-wheel" - contacts as a function of material and loading parameters. Physical mesomechanics 5 (2002) 17-25. [in Russian]
- [9] R. Abu-Rjal, L. Prigozhin, I. Rubinstein & B. Zaltzman (2017), Equilibrium electro-convective instability in concentration polarization: The effect of non-equal ionic diffusivities and longitudinal flow. Russian Journal of Electrochemistry, 53(9), 903-918. 10.1134/S1023193517090026
- [10] Y. Kim, W.S. Walker & D.F. Lawler (2010), The painlevé equation of the second kind for the binary ionic transport in diffusion boundary layers near ion-exchange membranes at overlimiting current. Journal of Electroanalytical Chemistry, 639(1-2), 59-66. 10.1016/j.jelechem.2009.11.019
- [11] A.S. Khair & T.M. Squires, (2008), Fundamental aspects of concentration polarization arising from nonuniform electrokinetic transport. Physics of Fluids, 20(8)10.1063/1.2963507
- [12] P. Diaconis, J. Fulman & R. Guralnick, (2008), On fixed points of permutations. Journal of Algebraic Combinatorics, 28(1), 189-218. 10.1007/s10801-008-0135-2
- [13] K. Binder & W. Paul, (2008), Recent developments in monte carlo simulations of lattice models for polymer systems. Macromolecules, 41(13), 4537-4550. 10.1021/ma702843z
- [14] N.Yu. Loginov, Study of tribological characteristics of samples with the coating made by electric-spark method. Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2 (2017) 67-70. [in Russian]
- [15] Y.K. Mashkov, D.N. Korotaev, M.Y. Baibaratskaya & B.S. Alimbaeva (2015), Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. Technical Physics, 60(10), 1489-1493. doi:10.1134/S1063784215100217.
- [16] Y.K. Mashkov, D.N. Korotaev, M.Y. Baybaratskaya & B.S. Alimbaeva (2015), Research and optimization of technological modes of electro-spark processing details of tribosystem. Paper presented at the 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 - Proceedings, doi:10.1109/Dynamics.2014.7005682.

- [17] Y. Wang, H. Yu, H. Shi, R. Qiu & K. Zhang (2013), Interface behavior of WC coatings on 40Cr steel by electro-spark deposition. *Cailiao Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment*, 34(8), 173-176.
- [18] V. Tebaldo, L. Kilpi, H. Ronkainen & M.G. Faga (2018), Tribological properties of AlTiN coating in sliding contact with Ti6Al4V: A helpful tool for disentangling the phenomena complexity during real turning operations. *Tribology International*, 123, 71-80. 10.1016/j.triboint.2018.02.023
- [19] M. Abedi, A. Abdollah-zadeh, M. Bestetti, A. Vincenzo, A. Serafini & F. Movassagh-Alanagh (2018), The effects of phase transformation on the structure and mechanical properties of TiSiCN nanocomposite coatings deposited by PECVD method. *Applied Surface Science*, 444, 377-386. 10.1016/j.apsusc.2018.02.263
- [20] S.A.S. Amiril, E.A. Rahim, Z. Embong & S. Syahrullail (2018), Tribological investigations on the application of oil-miscible ionic liquids additives in modified jatropha-based metalworking fluid. *Tribology International*, 120, 520-534. 10.1016/j.triboint.2018.01.030
- [21] S. Huang, T. Lv, X. Xu, Y. Ma & M. Wang (2018), Experimental evaluation on the effect of electrostatic minimum quantity lubrication (EMQL) in end milling of stainless steels. *Machining Science and Technology*, 22(2), 271-286. 10.1080/10910344.2017.1337135

При обработке фрезой отрезка OA дуга касания фрезы с обрабатываемой деталью a минимальная: $a = 00_1 = AA_1$.

При обработке фрезой отрезка AB дуга касания постоянно растет. Вместе с тем растут и силы резания. Эту часть обработки назовем заходом фрезы в угол.

Обработка дуги BC обрабатываемой детали происходит с постоянной максимальной дугой контакта $a = BB_1 = CC_1$.

При фрезеровании дуги заготовки CD происходит постепенное уменьшение дуги контакта. Эту часть обработки назовем выходом из угла.

Дальнейшая обработка ведется с постоянным минимальным контактом фрезы с заготовкой, равным начальному условию $a = DD_1 = AA_1$.

На рисунке 3 представлен график изменения дуги контакта инструмента с заготовкой по времени при такой обработке.

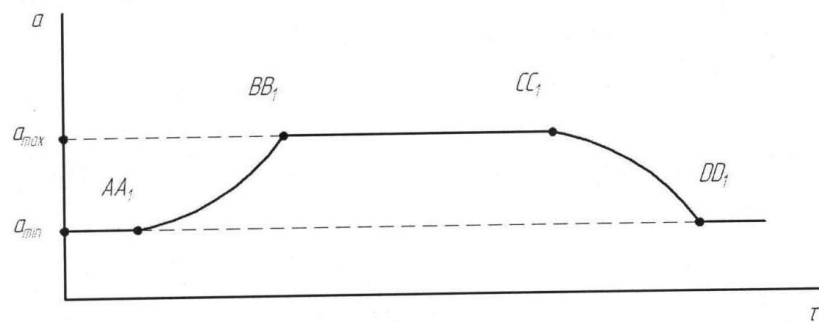


Рис. 3. Зависимость дуги контакта фрезы с заготовкой от времени

Увеличение величины дуги контакта инструмента с заготовкой влечет за собой увеличение сил резания. Это формирует следующую задачу для автоматического управления фрезерованием: изменить режимы резания и привести к их оптимальным при переходе от обработки прямолинейного участка к криволинейному. Сила резания прямо пропорциональна частоте вращения фрезы, а частоту — задает инженер, формирующий управляющую программу для устройства ЧПУ.

Решая геометрическую задачу, нами была получена зависимость длины дуги контакта инструмента с обрабатываемой деталью при фрезеровании прямолинейного участка

$$a = R \arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right). \quad (1)$$

Также была получена такая зависимость для углового участка

$$a = R \arccos \left(1 - \frac{t(2r-t)}{2R(r-R)} \right), \quad (2)$$

где r – радиус угла обработки; R – радиус фрезы; t – глубина фрезерования.

Частота вращения инструмента должна быть изменена пропорционально изменению дуги контакта. Поэтому принимаем коэффициент изменения частоты вращения инструмента для перехода от фрезерования прямолинейного участка к радиусному в виде

$$k = \frac{\arccos \left(1 - \frac{t}{R} \right)}{\arccos \left(1 - \frac{t(2r-t)}{2R(r-R)} \right)}. \quad (3)$$

Нами была рассчитана частота для следующих условий обработки: $t=2$ мм, $R=10$ мм, $r=25$ мм. Полученные данные показали, что при переходе от обработки прямолинейного участка к угловому, необходимо уменьшить частоту вращения фрезы на 22%.

Список использованных источников:

1. Асташенко В.И. О производстве биметаллических штампов горячего деформирования / В.И. Асташенко, Р.А. Бикулов, М.С. Колесников, И.О. Леушин, Ю.С. Миронова, В.Ю. Новиков, И.Е. Новикова // Литейное производство. – 2012. - №12. – С. 5-6.
2. Пивнева С.В. Моделирование процессов перемещения и складирования штампов в прессовом производстве / С.В. Пивнева, А.В. Коженев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2010. - №4. – С. 25-26.
3. Кресик Д.А. Производительные методы черновой обработки сложных поверхностей штампов и пресс-форм / Машиностроитель. – 2007. - №9. – С. 18-20.
4. Гордеев А.В. Оптимизация технических параметров при решении инженерных задач / А.В. Гордеев, Н.Ю. Логинов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. - №4. – С. 25-30.
5. Глухова Л.В. Автоматизированное управление инновационным процессом предприятия на примере производства штампов / Л.В. Глухова, К.В. Зоров // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2009. - №17. – С. 163-172.