

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРО-, МАКРО- И ИНТЕГРАЛЬНОГО КОНТАКТОВ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗДЕЛИЕМ И СТРУЖКОЙ

**В.И. Александров, Е.И. Глинкин, А.В. Егоров, Д.А. Руденко**

*Кафедра "Технология машиностроения,  
металлорежущие станки и инструменты", ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** внешняя и внутренняя электрические цепи; ЭДС резания, макро- и микроконтактов; вольтамперные характеристики; соприкосновения контактов.

**Аннотация:** Приводятся электрические характеристики контактов инструмента с изделием и стружкой различных уровней локализации и интегрального контакта "инструмент-изделие", полученные экспериментально, расчетом по аналитической и компьютерной моделям. Это позволяет провести более полную оптимизацию процесса резания.

### Обозначения

$E^i$  – ЭДС локальных макроконтактов инструмента с изделием и стружкой, В;

$E^{\Gamma 3}$  – ЭДС макроконтакта главной задней поверхности инструмента с изделием, В;

$I^i$  – ток  $i$ -го локального макроконтакта, А;

$I^{\Gamma 3}$  – ток макроконтакта главной задней поверхности инструмента с изделием, А;

$I_{x,y,z}^{\mu i}$  – ток, проходящий через микроконтакт с координатами  $x, y, z$   $i$ -го локального макроконтакта, А;

$I_{x,y,z}^{\mu п}$ ,  $I_{x,y,z}^{\mu 3}$  – токи в микроконтактах, с текущими координатами  $x, y, z$ , передней поверхности инструмента со стружкой и задних поверхностей инструмента с изделием, соответственно, А;

$n^i$  – количество микроконтактов в  $i$ -м локальном макроконтакте инструмента с изделием или стружкой;

$R$  – сопротивление внешней цепи технологической системы, Ом;

$r^i$  – сопротивление  $i$ -го локального макроконтакта, Ом;

$r_{x,y,z}^{\mu п}$ ,  $r_{x,y,z}^{\mu 3}$  – внутренние сопротивления микроисточников ЭДС с текущими координатами  $x, y, z$ , передней поверхности инструмента со стружкой и задних поверх-

ностей инструмента с изделием, соответственно, Ом;

$U$  – падение напряжения во внешней цепи интегрального контакта, В;

$U_{x,y,z}^{\mu i}$  – падение напряжения во внешней цепи микроконтакта с координатами  $x, y, z$   $i$ -го локального макроконтакта, В;

$\bar{u}^i$  – среднее значение падения напряжения в  $i$ -х локальных макроконтактах инструмента с изделием и стружкой, В;

$u_{x,y,z}^{\mu п}$ ,  $u_{x,y,z}^{\mu 3}$  – падения напряжения в микроконтактах с координатами  $x, y, z$  передней поверхности инструмента со стружкой и задних поверхностей инструмента с изделием, соответственно, В;

$y_{x,y,z}^{\mu i}$  – проводимость микроконтактов с координатами  $x, y, z$   $i$ -го локального макроконтакта, См.

### Индексы

$i$  – локальный макроконтакт: передней поверхности инструмента со стружкой; главной задней поверхности инструмента с поверхностью резания изделия; вспомогательной задней поверхности с обработанной поверхностью изделия;

$x, y, z$  – координаты микроконтактов электрофизической модели.

## Введение

Многочисленные, ранее проводившиеся в стране и за рубежом, исследования электрических явлений при резании различных металлов инструментами разных типов и марок токопроводящего материала позволили с достаточной точностью установить только величину и порядок ЭДС, генерируемых интегральным контактом “инструмент-изделие”. Данные о величинах токов и сопротивлениях интегрального контакта до настоящего времени носят дискуссионный характер, а данные об электрических характеристиках локальных макро- и микроконтактов отсутствуют. Отсутствие данных об электрических характеристиках макро- и микроконтактов не позволяет проникнуть в суть явлений, происходящих в зоне резания, понять их природу и, как следствие, принять обоснованные управляющие решения по устранению или минимизации негативного воздействия электрического тока на износостойкость инструмента и качество обработки изделия.

### Электрические характеристики микроконтактов рабочих поверхностей инструмента

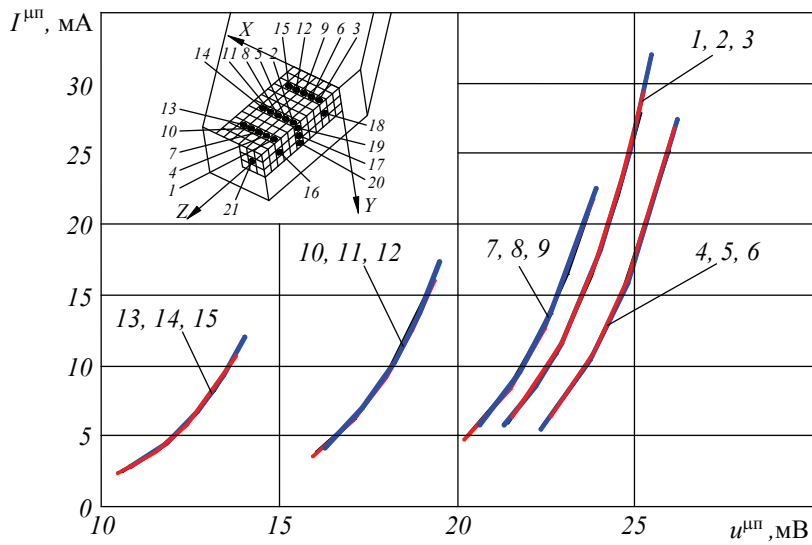
Вольтамперные характеристики (ВАХ) микроконтактов, полученные по [1], их нумерация и схема расположения на рабочих поверхностях инструмента показаны на рис. 1. Нумерация кривых ВАХ на рис. 1 и 2 соответствует нумерации микроконтактов.

Анализ ВАХ микроконтактов передней поверхности инструмента со стружкой (см. рис. 1, *a*) показывает, что все они нелинейны, причем величина токов  $I_{x,y,z}^{\mu\pi}$  и напряжений  $u_{x,y,z}^{\mu\pi}$  в микроконтактах, а также их сопротивление  $r_{x,y,z}^{\mu\pi}$  существенно зависят от их координаты. При обычных условиях обработки, характеризующихся импульсными колебаниями сопротивления  $R$  внешней цепи технологической системы, величина тока, падение напряжения в микровыступах инструмента и сопротивление микроконтактов передней поверхности инструмента зависят от состояния внешней цепи технологической системы и импульсно изменяются с частотой, равной частоте изменений состояния внешней цепи. Направления токов в микровыступах передней поверхности инструмента от состояния внешней цепи технологической системы не зависят, и в любом ее состоянии токи имеют положительное направление – из инструмента в стружку.

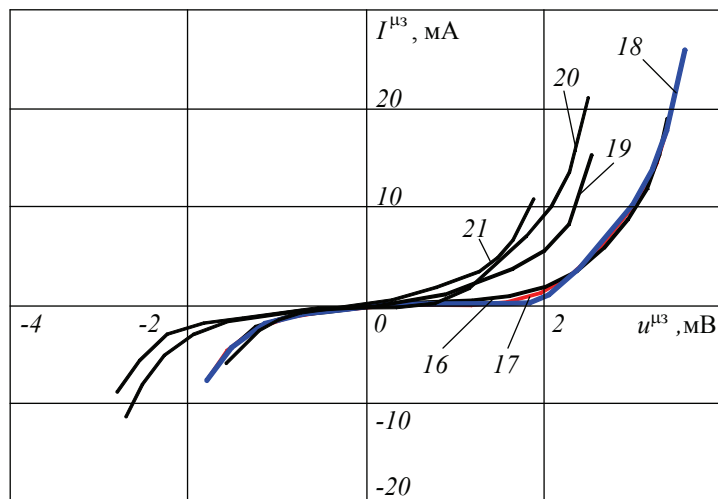
В разомкнутом состоянии внешней цепи токи в микровыступах передней поверхности достигают минимальной величины. Меньшие значения токов в разомкнутом состоянии внешней цепи возникают на периферии контакта. Более существенные отличия в величине токов на микровыступах передней поверхности возникают при коротком замыкании внешней цепи. В моменты короткого замыкания ( $R \rightarrow 0$ ) максимальные токи, величиной 27,87...32,04 мА, проходят через микроконтакты 1, 2 и 3, лежащие в непосредственной близости к главной режущей кромке (см. вставку на рис. 1, *a*).

Напряжения  $u_{x,y,z}^{\mu\pi}$  микроконтактов также зависят от их координаты и состояния внешней цепи. Размыкание внешней цепи приводит к снижению напряжения микроконтактов на 3...4 мВ.

На рис. 2, *a* показано влияние состояния внешней цепи технологической системы металлообработки на сопротивление микроконтактов передней поверхности инструмента. Сравнительный анализ кривых на рис. 1, *a* и 2, *a* показывает, что сопротивление микроконтактов зеркально их ВАХ. Максимальные сопротивления микроконтактов в пределах 3,34...4,55 Ом возникают при размыкании внешней



a)



б)

**Рис. 1 ВАХ микроконтактов рабочих поверхностей итнструмента**

цепи. В замкнутом состоянии внешней цепи сопротивления микроконтактов монотонно падают до 0,789...1,17 Ом. Максимальные сопротивления при всех состояниях внешней цепи имеют микроконтакты 13, 14 и 15, расположенные на периферии макроконтакта передней поверхности. Во всех состояниях внешней цепи технологической системы минимальными сопротивлениями обладают микроконтакты 1, 2 и 3, примыкающие к главной режущей кромке инструмента. Колебание сопротивления микроконтактов 1, 2 и 3, примыкающих к главной режущей кромке максимально по отношению ко всем другим микроконтактам передней поверхности.

На рис. 1, б показаны ВАХ микроконтактов задних поверхностей инструмента с изделием, которые принципиально отличаются от ВАХ контакта передней поверхности инструмента со стружкой. ВАХ микроконтактов задних поверхностей также нелинейны, но имеют три предельных состояния и две ветви, одна из которых располагается в области положительных значений, а другая – в области отрицательных значений напряжений и тока. В обычных условиях резания, токи в микроконтактах задней поверхности растут по мере снижения сопротивления внешней цепи и при  $R = 10^{-5}$  Ом достигают величины 10,74...26 мА – одного порядка с токами передней поверхности. Инверсия тока в отдельном микроконтакте задней поверхности возникает при превышении напряжения внешней цепи этого микроконтакта над величиной генерируемой им ЭДС. При  $R > 0,007...0,015$  Ом внешняя цепь стремится к разомкнутому состоянию и все микроконтакты задней поверхности инструмента постепенно трансформируются в потребители электрической энергии. В разомкнутом состоянии внешней цепи через микроконтакты задней поверхности текут токи величиной 5,8...11,32 мА. Размыкание внешней цепи параллельно с инверсией снижает токи в микроконтактах задней поверхности инструмента.

Максимальные же сопротивления (рис. 2, б), достигающие 1,6...4,5 Ом, микроконтакты задней поверхности инструмента имеют при сопротивлениях  $R$  внешней цепи порядка 0,007...0,01 Ом, при которых ток на микроконтактах равен или близок к нулю. Анализ кривых на рис. 2, б показывает также, что сопротивления внешней цепи, превышающие  $2 \cdot 10^{-2}$  Ом, на сопротивления микроконтактов задней поверхности инструмента практического влияния не оказывают.

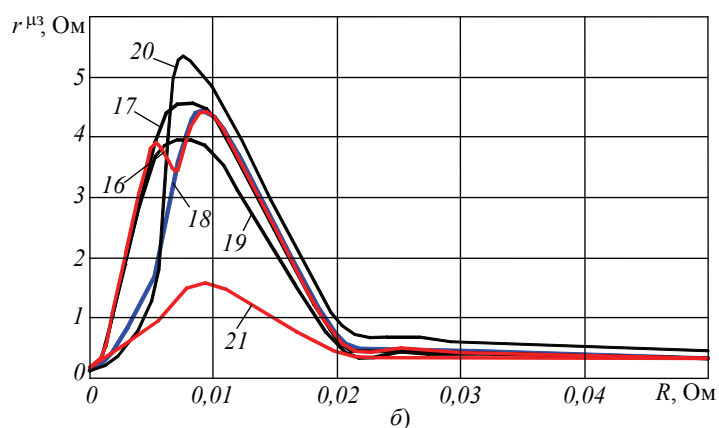
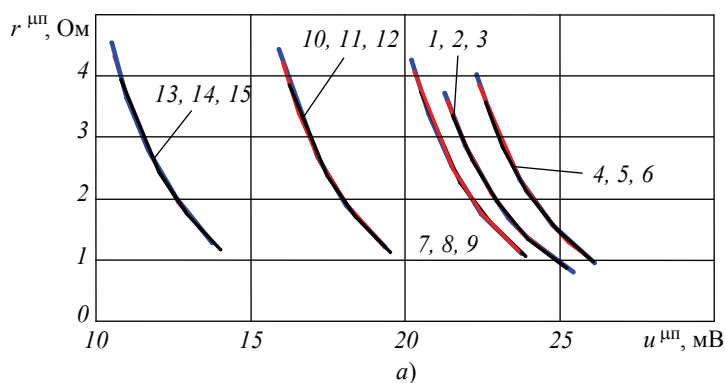


Рис. 2 Влияние состояния внешней цепи на сопротивление микроконтактов рабочих поверхностей инструмента

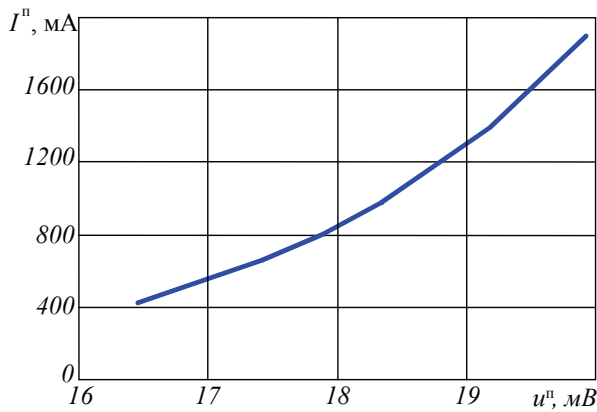
### Электрические характеристики макроконтактов инструмента с изделием и стружкой

На рис. 3 представлены ВАХ  $i$ -х локальных макроконтактов инструмента с изделием и стружкой, генерирующих ЭДС  $E^i$  и состоящих из  $n^i$  числа микроконтактов, полученные в результате расчета [1] средних напряжений  $\bar{u}^i$ , токов  $I^i$  и сопротивлений  $r^i$  макроконтактов, по формулам:

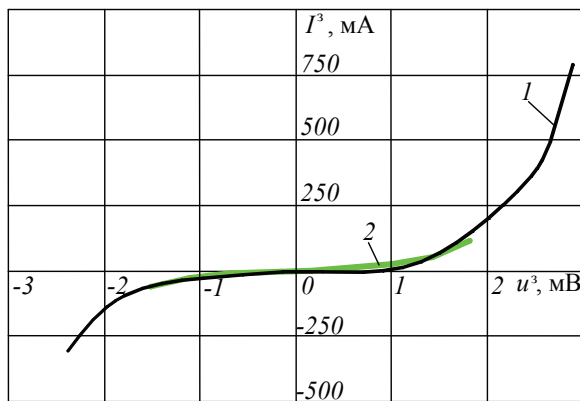
$$\bar{u}^i = E^i - \frac{1}{n^i} \sum_1^{n^i} U_{x,y,z}^{\mu i}, \quad (1)$$

$$I^i = \sum_1^{n^i} I_{x,y,z}^{\mu i}, \quad (2)$$

$$r^i = \frac{1}{\sum_1^{n^i} y_{x,y,z}^{\mu i}}. \quad (3)$$



a)



б)

Рис. 3 ВАХ макроконтактов рабочих поверхностей инструмента

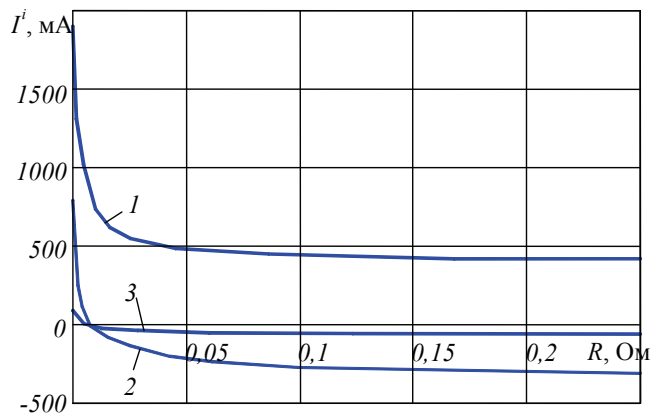
ВАХ макроконтakta передней поверхности инструмента со стружкой экспоненциально нелинейна и охватывает весь диапазон, действующих на ней напряжений при сопротивлениях  $R$  от  $10^{-5}$  до  $10^3$  Ом. Максимальные напряжения  $\sim 20$  мВ и токи  $\sim 1900$  мА возникают на передней поверхности инструмента при коротком замыкании внешней цепи. В разомкнутом состоянии внешней цепи напряжения и токи на передней поверхности снижаются и достигают минимальных значений: соответственно  $\sim 16,5$  мВ и  $\sim 422$  мА. Таким образом, импульсная смена замкнутого состояния внешней цепи на разомкнутое снижает напряжение контакта в 1,2 раза и, не изменяя направления, силу тока – в 4,5 раза.

ВАХ макроконтactов задних поверхностей инструмента с изделием (рис. 3, б) также экспоненциально нелинейны, но имеют более сложную форму. Начало координат для кривых  $U(I)$  является характерной точкой, разделяющей их на два участка, в которой  $U$  и  $I$  равны нулю. Область положительных значений тока и напряжения ВАХ соответствует малым сопротивлениям  $R$  и направлению тока, принятому за положительное, т.е. из задней поверхности инструмента – в изделие, при котором макроконтact является источником электрической энергии. Совместный анализ графиков на рис. 3, а и рис. 3, б показывает, что в замкнутом состоянии внешней цепи ток в макроконтacte передней поверхности инструмента со стружкой превышает ток в макроконтacte задних поверхностей инструмента с изделием в 2,1 раза. При размыкании внешней цепи локальные токи макроконтactов передней и задней поверхностей инструмента сближаются по абсолютной величине.

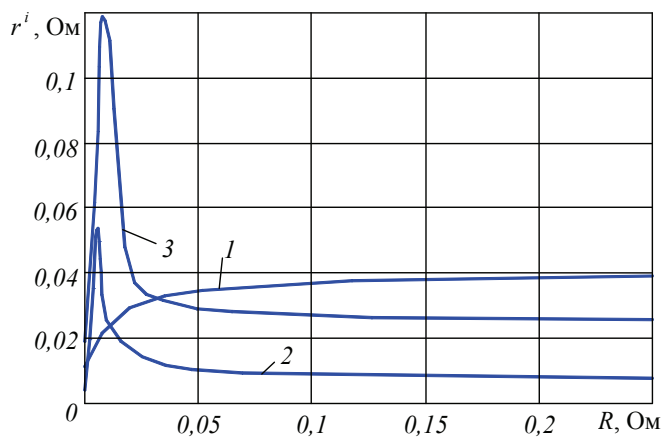
На рис. 4 представлены графики влияния сопротивления  $R$  внешней цепи технологической системы на величину токов  $I^i$  и сопротивлений  $r^i$  локальных макроконтactов инструмента. Из графиков на рис. 4, а видно, что максимальные токи проходят через макроконтact передней поверхности инструмента со стружкой (кривая 1). Направление токов на передней поверхности инструмента инвариантно к состоянию внешней цепи технологической системы. В большей части диапазона  $R$  величина токов макроконтactа передней поверхности практически стабильна и функция  $I^{\text{II}}(R)$  близка к линейной. В диапазоне  $4,5 \cdot 10^{-2} > R > 1 \cdot 10^5$  Ом функция  $I^{\text{II}}(R)$  подчиняется экспоненциальному закону, и при  $R = 1 \cdot 10^{-5}$  Ом ток в макроконтacte достигает 1900 мА.

Характер функций  $I^{3i}(R)$  для макроконтactов главной (кривая 2) и вспомогательной (кривая 3) задних поверхностей подобен характеру функции  $I^{\text{II}}(R)$  макроконтactа передней поверхности инструмента со стружкой. Отличительными особенностями кривых 2 и 3 по сравнению с кривой 1 является то, что, во-первых, через макроконтactы задних поверхностей инструмента протекают токи меньшей величины; во-вторых, то, что в диапазоне  $0,005 < R < 1000$  Ом результирующие токи в макроконтactах задних поверхностей имеют отрицательный знак, т.е. направлены встречно результирующему току в макроконтacte передней поверхности и, в-третьих, то, что при  $R = 0,005$  Ом токи в макроконтactах задних поверхностей равны нулю.

Несомненный, причем, не только теоретический, интерес представляют графики  $r^i(R)$ , показанные на рис. 4, б. В большей части диапазона  $R$  – от  $\infty$  до 0,1 Ом кривые практически параллельны друг другу и оси абсцисс. В диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} > R > > 1 \cdot 10^{-5}$  Ом результирующее сопротивление макроконтactа передней поверхности инструмента со стружкой экспоненциально убывает и при коротком замыкании контакта «инструмент-изделие» достигает своей минимальной величины – 0,011 Ом. Зависимости  $r^i(R)$  макроконтactов задних поверхностей инструмента с изделием носят импульсно-экстремальный характер, достигая при  $R = 0,005$  Ом максимума в 0,093 и 0,12 Ом, соответственно для макроконтactа с изделием главной



a)



б)

**Рис. 4** Влияние сопротивления внешней цепи на силу тока (а) и сопротивление (б) макроконтактов рабочих поверхностей инструмента

и вспомогательной задних поверхностей инструмента. Таким образом, максимальное, хотя и кратковременное, сопротивление макроконтактов задних поверхностей инструмента с изделием возникает не в стабильно разомкнутом состоянии внешней цепи, как предполагали ранее многие исследователи электрических явлений при резании, а при  $R$ , близких к предельному, при котором контакт «инструмент-изделие» замкнут накоротко.

#### **Электрические характеристики интегрального контакта «инструмент-изделие» и электрические поля в зоне резания**

На рис. 5 представлены ВАХ интегрального контакта «инструмент-изделие», полученные экспериментально – кривая 3; расчетом по аналитической модели [2, 3] – кривая 2; расчетом по компьютерной модели [1] – кривая 1.

Для построения экспериментальной ВАХ сопротивление внешней цепи  $R$  изменялось в диапазоне от 0,003 до 1000 Ом. При вышеназванных геометрических и режимных параметрах ЭДС резания  $E$  составила 12 мВ.

Как видно из рис. 5, экспериментальная ВАХ не дает исчерпывающей информации о величинах тока и сопротивлений контакта «инструмент-изделие».

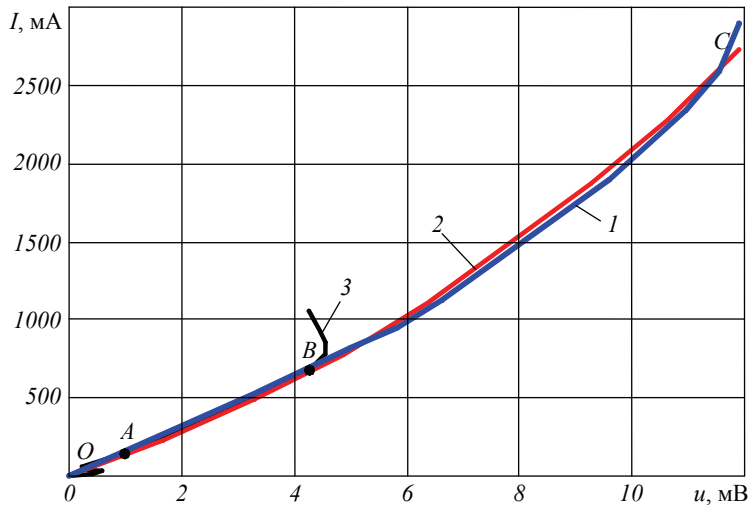


Рис. 5 ВАХ интегрального контакта «инструмент-изделие»

Область корректных значений напряжения и тока экспериментальной ВАХ ограничена участком  $AB$ , полученным при сопротивлениях внешней цепи  $0,01 < R < 0,07$  Ом. Информация о силе тока и сопротивлении контакта при  $4,36 < U < 12$  мВ и  $R < 0,01$  Ом, а также при  $0 < U < 1,05$  мВ и  $R > 0,07$  Ом отсутствует. При этом экспериментально найденная сила тока в контакте находится в пределах  $150,3 \dots 720,3$  мА.

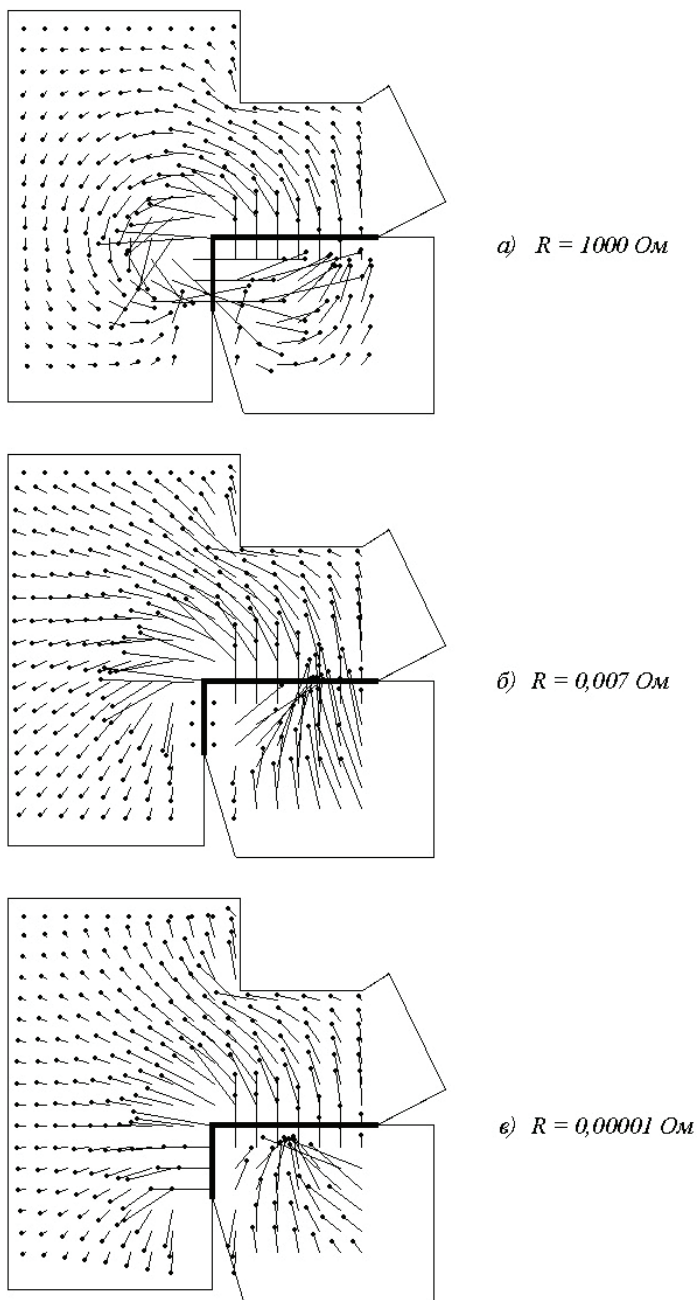
Кривая  $I$  (см. рис. 5) охватывает весь ( $0 \dots 12$  мВ) диапазон напряжений интегрального контакта и практически полностью совпадает с участком  $AB$  корректных измерений кривой  $3$ , что свидетельствует об адекватности разработанной компьютерной электрофизической модели электрическим процессам, протекающим при резании в контакте «инструмент-изделие».

На рис. 6 показаны электрические поля в сечении главной секущей плоскостью, проходящей через середину длины площадки контакта, возникающие при установившемся несвободном резании, при трех характерных состояниях внешней цепи технологической системы. На схемах стрелками показано направление и величина тока в каждой из ячеек массива [1]. В разомкнутом состоянии внешней цепи (см. рис. 6,  $a$ ), когда падение напряжения  $U$  в ней больше ЭДС  $E^{\Gamma 3}$ , вся энергия, генерируемая контактом, им же и поглощается. При этом источником электрической энергии является контакт передней поверхности инструмента со стружкой, а контакт задней поверхности инструмента с изделием – потребителем (ток  $I^{\Gamma 3}$  направлен из изделия в инструмент).

В другом предельном состоянии (рис. 6,  $b$ ) сопротивление внешней цепи не превышает  $10^{-5}$  Ом, напряжение  $U < E^{\Gamma 3}$ , т. е. ток  $I^{\Gamma 3}$  направлен из инструмента в изделие. При этом как передняя, так и задняя поверхности инструмента являются источниками энергии.

Электрическое поле, показанное на рис. 6,  $b$ , соответствует состоянию внешней цепи технологической системы при котором ток в контакте задней поверхности инструмента с изделием равен нулю или близок к нулевому значению, а ток, регистрируемый во внешней цепи, равен току в контакте передней поверхности инструмента со стружкой.





**Рис. 6** Влияние состояния внешней цепи технологической системы на электрические поля в зоне развития

### Выводы

Компьютерная модель в сочетании с экспериментальными данными об электрических характеристиках локальных макроконтатов, полученными при одном сопротивлении внешней цепи, позволяет выявить электрические характеристики не только интегрального, но и макро- и микроконтатов во всем диапазоне сопротивлений внешней цепи технологической системы. При этом:

1. Величины токов, напряжений и сопротивлений микроконтактов рабочих поверхностей инструмента с изделием и стружкой существенно зависят от их расположения.

2. В микроконтактах передней поверхности инструмента в разомкнутом состоянии внешней цепи отмечается примерное равенство токов, которое по мере снижения сопротивления внешней цепи все более нарушается. Максимальные токи проходят через микроконтакты передней поверхности, лежащие в непосредственной близости к главной режущей кромке.

3. ВАХ микроконтактов и локальных макроконтактов задних поверхностей инструмента носят знакопеременный характер.

4. Смена предельных состояний внешней цепи приводит к изменению напряжений микроконтактов задней поверхности инструмента с изделием в существенно более узких пределах по сравнению с перепадом напряжений микроконтактов передней поверхности инструмента со стружкой.

5. Максимальные сопротивления при всех состояниях внешней цепи имеют микроконтакты, расположенные на периферии макроконтакта передней поверхности, а минимальные – микроконтакты макроконтакта передней поверхности, примыкающие к главной режущей кромке инструмента.

Полученная информация о электрических характеристиках контактов разных уровней локализации использована авторами для экспериментальной оценки влияния тока на стойкость инструмента.

#### *Список литературы*

1. Александров В.И., Глинкин Е.И., Егоров А.В., Руденко Д.А. Электрофизическая модель контактов инструмента с изделием и стружкой // Вестник ТГТУ. – 2003. №3. – Т. 9. – С. 493-502.

2. Глинкин Е.И. Схемотехника аналоговых интегральных схем. – Тамбов: ТГТУ, 2000. – 120 с.

3. Митрофанов О.В., Симонов Б.М., Коледов Л.А. Физические основы функционирования изделий микроэлектроники. – М.: Высш. шк., 1987. – 168 с.

---

## **Electrical Characteristics of Micro-, Macro- and Integral Contacts of Wiring Instrument with Product and Chip**

**V.I. Alexandrov, E.I. Glinkin, A.V. Egorov, D.A. Rudenko**

*Department "Technology of Machine Building, Metal-Cut Machines and Instruments", TSTU*

**Key words and phrases:** external and internal circuits; electromotive of cutting; macro- and micro-contacts; volt-ampere characteristics; contact resistance.

**Abstract:** Electrical characteristics of contacts of an instrument with chip at different levels of localization and integral contact "instrument – product" are given. They are obtained through experimental calculation using analytical and computer models, knowledge of which allows to optimize the process of cutting.

## **Elektrische Charakteristiken von Mikro-, Makro- und Integralkontakten des stromleitenden Werkzeuges mit dem Erzeugnis und dem Span**

**Zusammenfassung:** Es werden die elektrischen Charakteristiken von Kontakten des Werkzeuges mit dem Erzeugnis und dem Span der verschiedenen Lokalisierungsschichten und des Integralkontaktes "Werkzeug – Erzeugnis" angeführt. Diese mit der Berechnung nach Analytik- und Computermodellen erhaltene Charakteristiken lassen sich die völlere Optimisation des Schneidenprozesses durchgeführt.

---

## **Caractéristiques électriques des contacts micro, macro et intégraux de l'outil conducteur du courant électrique avec un produit et un copeau**

**Résumé:** Sont citées les caractéristiques électriques des contacts de l'outil avec un produit et un copeau de différents niveaux de la localisation et du contact intégral "outil-produit", reçues expérimentalement par un calcul d'après les modèles, analytiques et informatiques dont la connaissance permet de réaliser une optimisation plus complète du processus de coupe.

---