

# ВЛИЯНИЕ МАРКИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ НА ТЕРМО-ЭДС

Праведников И.С.

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в процессе резания металлов и сплавов происходит нагрев зоны контакта, который может рассматриваться как горячий спай естественной термомпары.

Запись электродвижущей силы, генерируемой в таком термоэлементе, позволяет получить информацию о средней температуре на поверхностях трения и о поведении контактного слоя в процессе его формирования. Известны три причины возникновения термо-ЭДС (ТЭДС) в зоне резания. Первая обусловлена зависимостью средней энергии электронов от температуры. Вторая – зависит от контактной разности потенциалов, если слои термоэлемента имеют различную температуру. Третья связана с эффектом увеличения энергии электронов фотонами-квантами поля колебания кристаллической решетки [1].

Наиболее реальный путь исследования термоэлектрических явлений при резании – экспериментальный. Он даёт возможность установить эмпирические зависимости, проанализировать и почти полностью исключить погрешности.

В исследованиях применялись различные типы твердосплавных пластин, специальные цельные резцы из сплавов ВК2, ВК4, ВК6, ВК8, ВК15, ВК6М и ВК6ОМ.

## ВЛИЯНИЕ МАРКИ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ТЕРМО-ЭДС

Рассмотрим влияние скорости резания как основного фактора, повышающего среднюю температуру контакта, на величину ТЭДС ( $E$ ) при обработке жаропрочного сплава ХН77ТЮ резцами группы WC-Co. В ранее проведенных исследованиях [2] зависимости  $E(V)$  для пары «жаропрочный сплав – твердый сплав» изображались в виде монотонно возрастающих функций. Автором обнаружены некоторые отклонения от этой монотонности – на различных скоростях резания наблюдается различная интенсивность изменения ТЭДС ( $E_n$ ) на передней поверхности инструмента. При анализе кривых  $E_n(V)$  (рис.1) можно выделить три участка изменения интенсивности. Причем, чем ниже красностойкость твердого сплава, тем уже эти участки и меньше скорости, при которых наблюдаются нарушения монотонности.

Показания ТЭДС во многом зависят как от температуры в зоне резания, так и от удельного электросопротивления пары «жаропрочный сплав – инструментальный сплав». Очевидно, что при постоянстве физических свойств твердых сплавов на величину ТЭДС оказывает самостоятельное влияние сам жаропрочный сплав ХН77ТЮ, а именно, его удельное электросопротивление, которое изменяется экстремально с повышением температуры подогрева. Автором разработан способ определения оптимальной скорости резания по максимальной величине удельного электросопротивления для всей группы сплавов на никелевой основе [3].

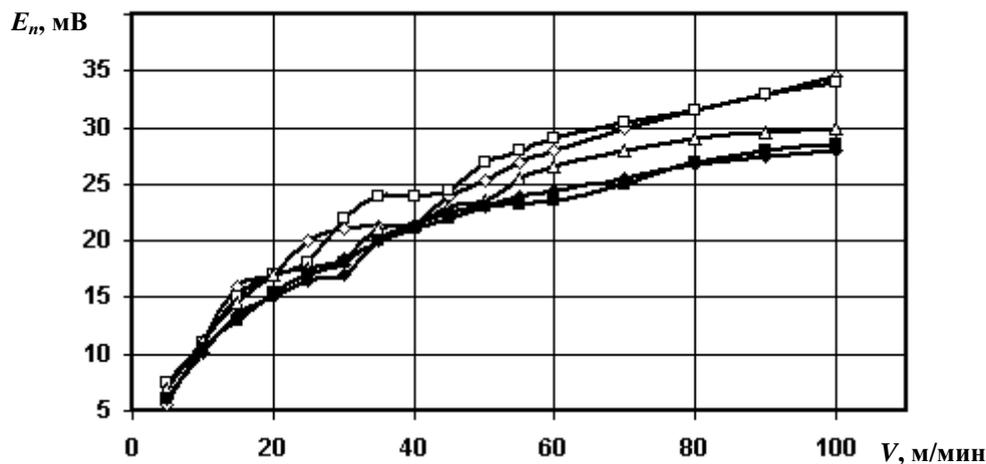


Рис.1. Влияние скорости резания и марки инструментального сплава на ТЭДС (ХН77ТЮ,  $S=0,11$  мм/об;  $t=0,5$  мм;  $j_c=1400\dots 1600$  кг/мм):  
 □ – ВК15; ◇ – ВК8; △ – ВК6; ■ – ВК2; ◆ – ВК4

Согласно данным [2], существенное влияние на тепловыделение на передней поверхности оказывает скорость перемещения стружки  $V_c$ .

Поэтому целесообразно было изучить поведение зависимости  $E_n(V_c)$ . Представленные данные показывают (рис.2), что при точении сплава ХН77ТЮ различными инструментальными сплавами наблюдаются зоны скоростей перемещения стружки с постоянной интенсивностью изменения ТЭДС.

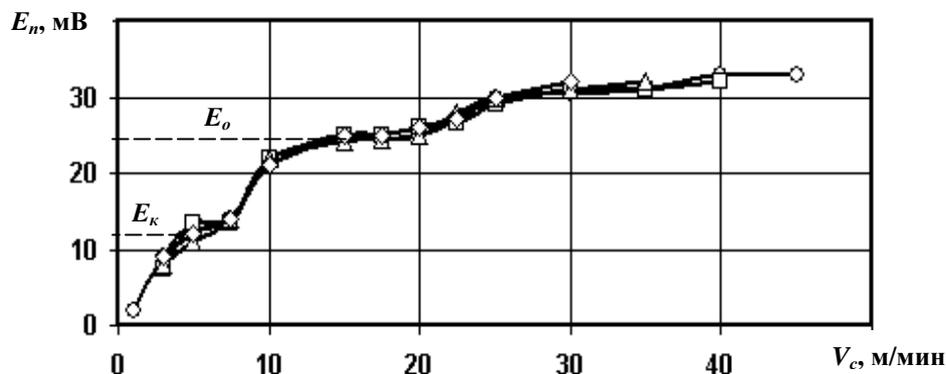


Рис.2. Влияние скорости движения стружки на ТЭДС при точении сплава ХН77ТЮ резцами системы WC-Co ( $S=0,11$  мм/об;  $t=0,5$  мм):  
 ○ – ВК2; □ – ВК4; △ – ВК8; ◇ – ВК15

Первая аномалия проявляется при значении  $E_n=15,5$  мВ, вторая – при  $E_n=26,5$  мВ. Тот факт, что критические точки (по величине) на единой кривой  $E_n(V_c)$  практически не зависят от марки инструментального сплава, они могут быть с успехом использованы при создании единой математической модели выбора оптимальных режимов резания жаропрочного сплава ХН77ТЮ твердыми сплавами системы WC-Co. Какова же природа стабилизации ТЭДС в определенных скоростных интервалах перемещения стружки? По всей вероятности, это существенное увеличение удельного электросопротивления контактного слоя при возрастании средней температуры от  $450^\circ$  до  $650^\circ$ , а также увеличение усадки стружки, что приводит к снижению скорости перемещения стружки  $V_c$ .

## ВЛИЯНИЕ МАРКИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМО-ЭДС

Процесс резания жаропрочных сплавов на никелевой основе сопровождается значительным тепловыделением, которое, в конечном счете, и определяет величину показаний ТЭДС. Специфической особенностью рассматриваемой группы материалов является активный рост средней температуры контакта по мере нарастания фаски износа. Следует отметить и то обстоятельство, что формоустойчивость режущей кромки инструмента из твердых сплавов системы WC-Co при обработке жаропрочных сплавов пока еще остается низкой по отношению ко многим обрабатываемым материалам.

Для оценки влияния марки жаропрочного сплава на ТЭДС использованы кривые  $E_n(V)$ , представленные на рис.3. Как видно, все кривые монотонно возрастают с разной интенсивностью. Чем выше жаропрочность сплава, тем выше расположена кривая  $E_n(V)$ .

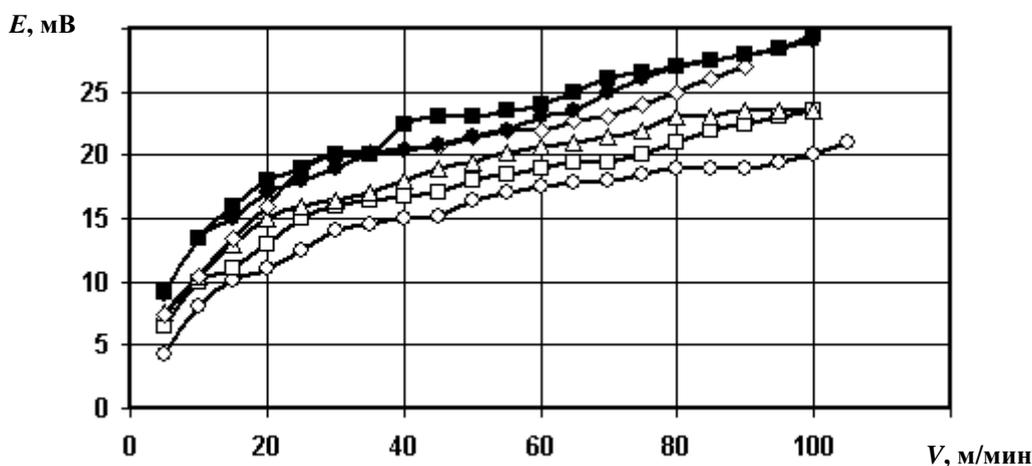


Рис.3. Влияние скорости резания и марки обрабатываемого сплава на ТЭДС (ВК60М;  $S=0,11$  мм/об;  $t=0,5$  мм;  $\gamma=0^\circ$ ;  $j_c=1400\dots1600$  кг/мм):  
 ■ – ХН51ВМТЮВКР; ● – ХН55ВИТФКЮ; ◇ – ХН73МБТЮ;  
 △ – ХН70ВМФТЮ; □ – ХН70ВМТЮ; ○ – ХН77ТЮ

Интересно отметить, что для сплава ХН77ТЮ ( $HB=320$ ) на  $V=45$  м/мин значение  $E_n=15,5$  мВ. Такое же значение и для сплава ХН51ВМТЮВКР ( $HB=420$ ) нами зафиксировано на  $V=15$  м/мин, т.е. понадобилось в три раза изменить скорость резания, чтобы термоэлектрические процессы, протекающие на передней поверхности, совпали по своей величине. Существование аномальных зон изменения ТЭДС для различных жаропрочных сплавов автором было установлено в 1974 году совместно с инженером Н.Ивановым. При анализе кривых  $E_n(V)$  можно выделить три таких участка. Чем выше жаропрочность обрабатываемого сплава, тем уже участки аномальности и наблюдаются они при меньших скоростях.

Величина  $E_n$  пропорционально зависит от  $\rho$ , поэтому она должна отражать все структурно-фазовые изменения, происходящие либо в контактных слоях, либо в самой стружке, либо на поверхности резания при точении жаропрочных сплавов.

Рассмотрим характер изменения  $E(V)$  (рис.4), полученной при обработке жаропрочных сплавов ХН70ВМФТЮ и ХН55ВИТФКЮ с различными фасками износа.

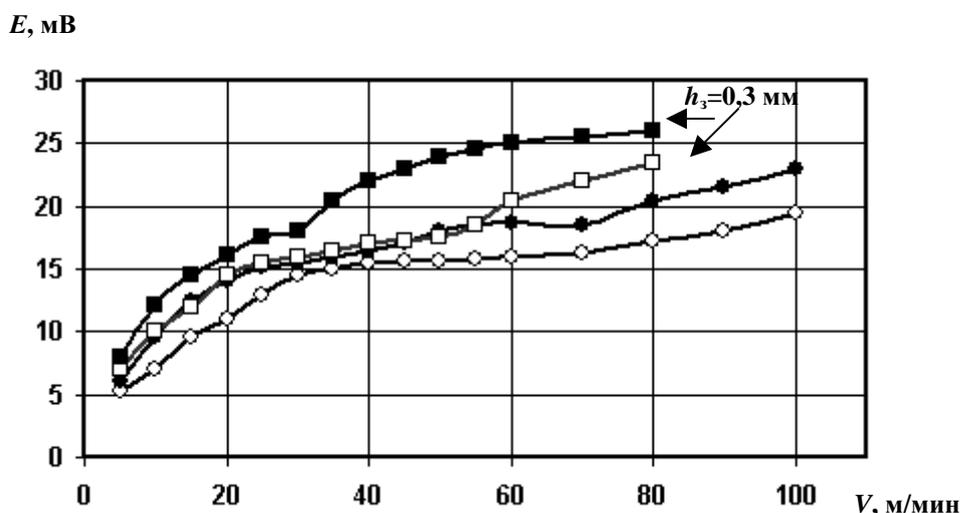


Рис.4. Влияние скорости резания, величины фаски износа и марки обрабатываемого сплава на ТЭДС:  
 ■, □ – ХН55ВИТФКЮ; ●, ○ – ХН70ВМФТЮ

При обработке сплава ХН70ВМФТЮ установлено, что в зоне скоростей резания от 40 до 65 м/мин также наблюдается стабилизация ТЭДС. Как видно, увеличение скорости резания в 1,5 раза привело к изменению  $E$  всего на 0,7 мВ. В основе такого явления могут быть две причины. Первая связана с ростом электросопротивления зоны скользящего контакта передней поверхности и, как следствие этого, с уменьшением фактического значения  $E$ , но при одновременном повышении средней температуры в зоне резания. Вторая связана с повышением пластических свойств контактных слоев стружки. Как отмечалось ранее [2], в этом же диапазоне скоростей резания наблюдается некоторое увеличение усадки стружки. Допустим, что мы изменили скорость резания в 1,5 раза. Тогда скорость перемещения стружки  $V_c$ , как функция усадки стружки, может измениться на другую величину. В том случае, когда усадка стружки начнет активно возрастать под действием каких-то внутренних явлений, действительная скорость перемещения стружки может даже оставаться постоянной. Очевидно, такие явления и наблюдаются в наших экспериментах. У более жаропрочного сплава ХН55ВИТФКЮ соответствующий диапазон скоростей значительно уже ( $V$  от 40 до 50 м/мин).

Опыты, проведенные при  $h_3=0,3$  мм, не изменили характера зависимости  $E(V)$ . Однако стабилизация  $E$  стала проявляться на более низких скоростях резания и в более узком диапазоне.

Тот факт, что по мере увеличения фаски износа характер кривых  $E(V)$  не меняется, лишний раз подтверждает, что среднее интегральное значение  $E$ , поступающее из зоны резания, в большей степени отражает природу контактных процессов, протекающих на передней поверхности инструмента.

Интересно проследить за характером поведения интенсивности изменения термоэлектродвижущей силы  $\Delta E$  в зависимости от скорости резания.

Результаты расчетов представлены на рис.5. Как видно, зависимости  $\Delta E(V)$  имеют экстремальный характер с минимумом на определенных скоростях резания.

Чем выше жаропрочность сплава, тем выше минимальное значение  $\Delta E$  и проявляется оно на более низкой скорости. Полученные кривые лишней раз подтверждают существование оптимальных скоростей не только по интенсивности износа, но и по интенсивности изменения ТЭДС, что является своеобразным источником информации о темпе протекания износа режущего инструмента.

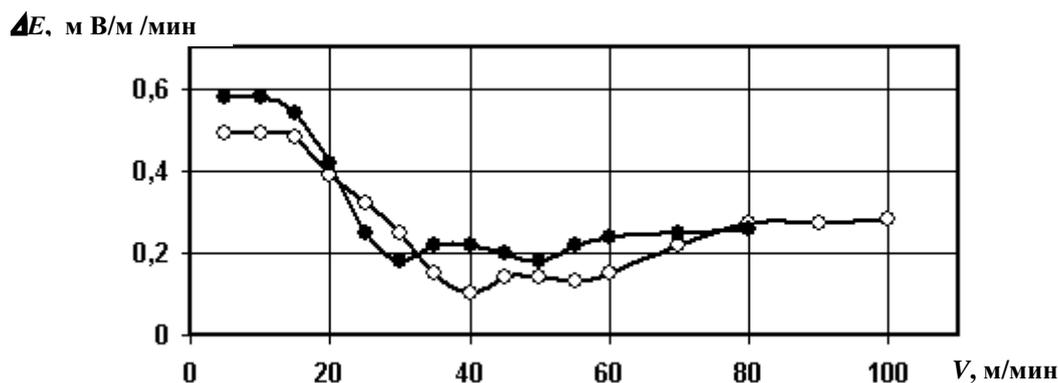


Рис.5. Влияние скорости резания на интенсивность ТЭДС:  
 ○ – ХН70ВМФТЮ,  $h_3=0$  мм; ● – ХН70ВМФТЮ,  $h_3=0,3$  мм

Особое внимание следует уделить тому факту, что трущаяся пара «жаропрочный сплав – твердый сплав» является динамичной совокупностью точечных микроспаев со сложной системой петель, уравнивающих термотокков вихревого характера. Наиболее благоприятные условия, очевидно, будут проявляться тогда, когда механизм проводимости в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента и задней поверхности с поверхностью резания будет одним и тем же. При существенной разнице температур на передней и задней поверхностях будет протекать сильный ток. Если температура передней и задней поверхностей в пределах выбранного критерия затупления будет выравниваться, то, видимо, мы будем наблюдать наименьшую интенсивность износа инструмента, наименьшую интенсивность изменения ТЭДС.

Изучение поведения зависимостей  $E_n(V)$  выявило для всей группы жаропрочных сплавов четкую связь между исходной твердостью жаропрочных сплавов и значением ТЭДС. Во всем диапазоне рассмотренных скоростей резания увеличение твердости приводит к увеличению  $E_n$ .

Ранее было показано, что процесс тепловыделения по передней поверхности целесообразно изучать не как функцию скорости резания, а в зависимости от скорости перемещения стружки  $V_c$ . Поэтому были получены зависимости  $E_n(V_c)$  (рис.6). Интересно отметить тот факт, что  $E_n$  не зависит от марки жаропрочных сплавов в диапазоне низких скоростей перемещения стружки от 0,3 до 7,5 м/мин. Это явление, по всей вероятности, связано со слабым еще воздействием температуры в указанном диапазоне на физико-механические свойства рассматриваемых жаропрочных сплавов.

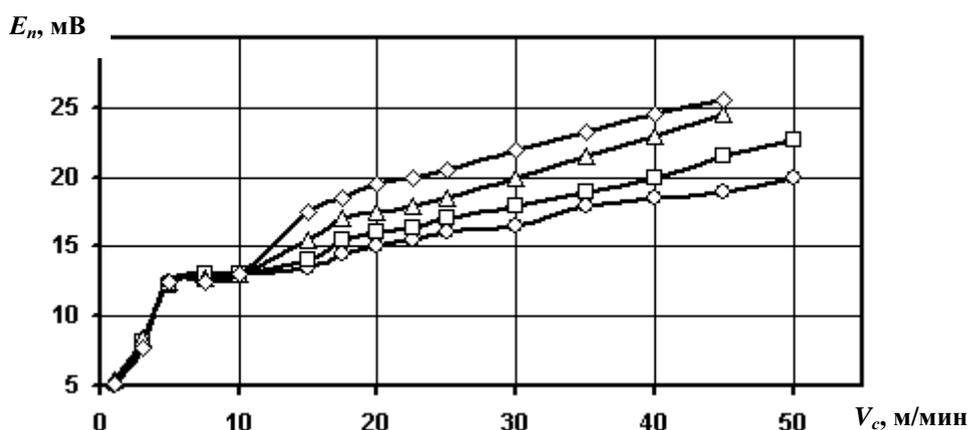


Рис.6. Влияние скорости движения стружки, марки обрабатываемых материалов на ТЭДС:

◇ – ХН51ВМТЮВКР; △ – ХН73МБТЮ; □ – ХН790ВМТЮ; ○ – ХН77ТЮ

Результаты адгезионных исследований также показали, что в низком диапазоне температур физико-механические свойства материала в контактном слое не зависят от марки жаропрочных сплавов. Очевидно, ТЭДС в полной мере фиксирует поведение деформируемого объема контактного слоя при относительном скольжении стружки по передней поверхности. Стабилизация на  $E_n=12,5$  мВ, отмечаемая для всей группы жаропрочных сплавов, возможно, отражает протекание единого, с точки зрения энергоёмкости, внутреннего процесса. С дальнейшим увеличением  $V_c$  кривые  $E_n(V_c)$  расходятся. Отчетливо становится заметно влияние марки жаропрочного сплава на  $E_n$ .

На относительно высоких скоростях перемещения стружки выявлена другая зона стабилизации ТЭДС. Однако величина  $E_n$  в этом случае заметно зависит от марки жаропрочного сплава. Так, если для сплава ХН77ТЮ  $E_n=15,5$  мВ, то для ХН51ВМТЮВКР  $E_n=17,5$  мВ. Это явление, по всей вероятности, связано с повышением энергоёмкости процесса, происходящего на передней поверхности инструмента.

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЭДС НА ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Занимаясь изучением характера изменения ТЭДС от величины фаски износа, автор предполагал, что фиксируемые значения  $E_n$  определяет среднее интегральное значение ТЭДС как на передней, так и на задней поверхности инструмента. Желание изучить характер изменения  $E$  на каждой поверхности привело автора к созданию способа определения ТЭДС как на передней, так и на задней поверхности инструмента.

Опыты проводились на сплаве ХН63МТЮК резцом ВК6М ( $t=0,75$  мм;  $S=0,11$  мм/об) на скоростях резания 10, 35 и 70 м/мин. При проведении эксперимента ТЭДС фиксировалась с помощью селективного вольтметра типа 251, установленного в цепь измерения амплитуды и частоты термоэлектрического потенциала (рис.7).

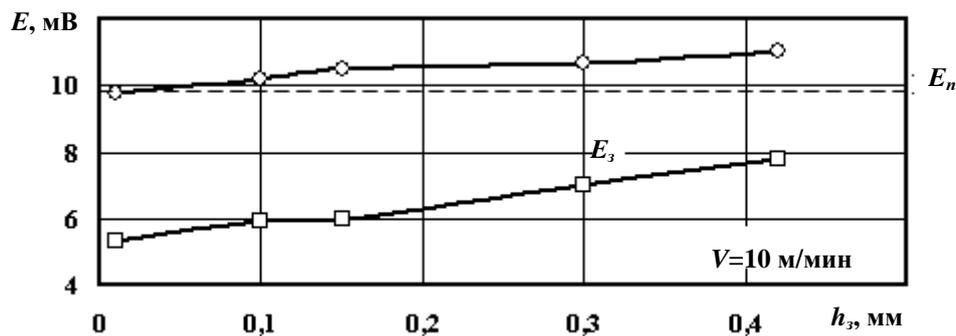


Рис.7. Влияние величины фаски износа на термо-ЭДС по передней и задней поверхности ( $V=10$  м/мин,  $S=0,11$  мм/об,  $t=0,75$  мм):

○ –  $E_n$ ; □ –  $E_z$

На передней поверхности при скорости резания 10 м/мин начальное значение термо-ЭДС  $E_n=9,3$  мВ. После остановки процесса резания сигнал поступал только со стороны задней поверхности и составил 5,4 мВ. Следует отметить, что начальная температура на задней поверхности оказалась в два раза меньше, чем на передней поверхности. По мере увеличения фаски износа фиксируемое значение ТЭДС определяется в основном температурным полем, действующим на передней поверхности. На задней поверхности инструмента наблюдается незначительное повышение ТЭДС и является следствием увеличения удельных касательных сил, перераспределением тепловых потоков со стороны задней поверхности на переднюю поверхность. И все-таки среднее значение ТЭДС на задней поверхности в 1,5 раза меньше, чем на передней.

Опыты, проведенные на средней скорости резания  $V=35$  м/мин показали, что по мере увеличения фаски износа от 0,05 до 0,47 мм ТЭДС, действующая на задней поверхности, увеличилась от 4,4 мВ до 17,6 мВ и приблизилась к ТЭДС на передней поверхности и составила 18,4 мВ (рис. 8).

Как установлено, четырехкратное увеличение ТЭДС на задней поверхности привело к пятипроцентному увеличению ТЭДС на передней поверхности. Все это лишний раз подтверждает правильность предположения автора о том, что активное нарастания температуры на задней поверхности по мере увеличения фаски износа не в состоянии существенно изменить температурный режим, возникший на передней поверхности инструмента.

Обработка сплава ХН63МТЮК на скорости резания 70 м/мин показала, что изменение ТЭДС на задней поверхности происходило интенсивнее, чем на ранее рассмотренных скоростях резания (рис.9).

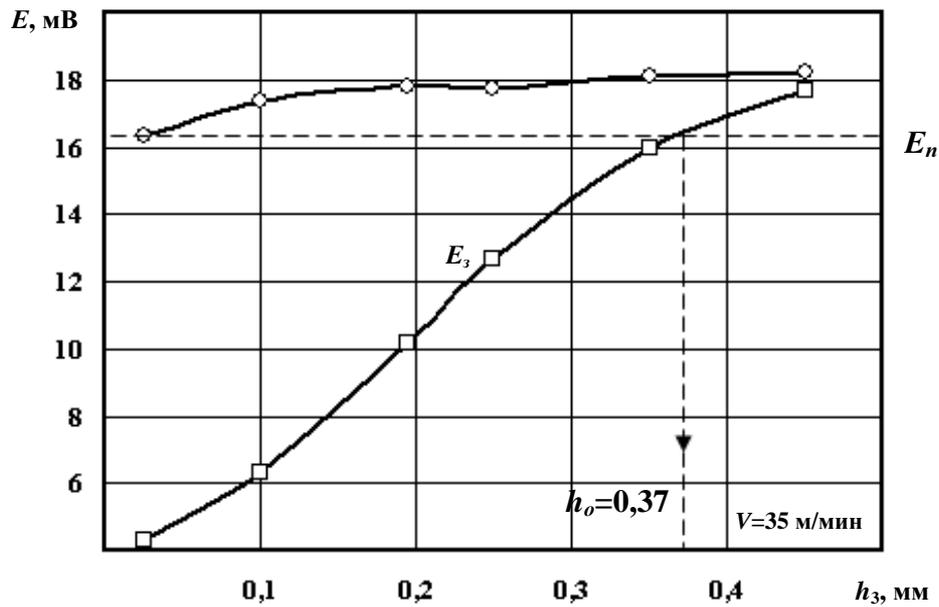


Рис.8. Влияние величины фаски износа на термо-ЭДС  
( $V=35$  м/мин,  $S=0,11$  мм/об,  $t=0,75$  мм):  $\circ$  –  $E_n$ ;  $\square$  –  $E_3$

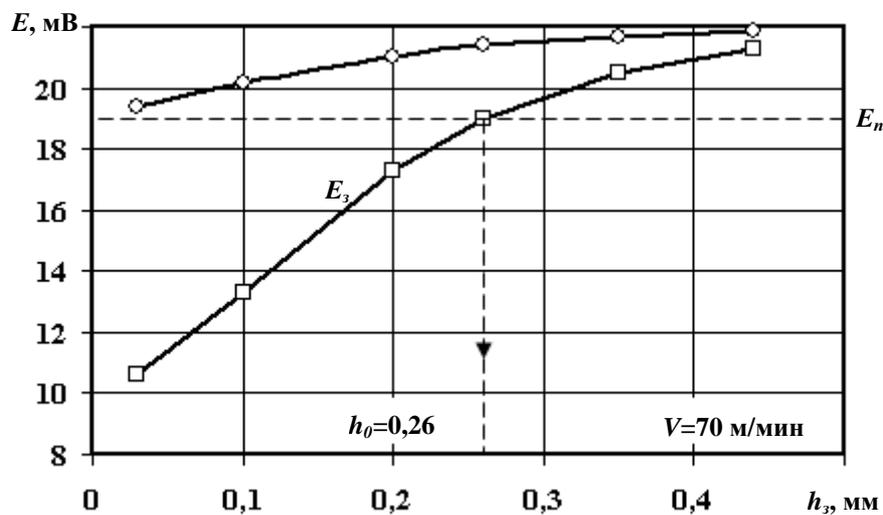


Рис.9. Влияние величины фаски износа на термо-ЭДС  
( $V=70$  м/мин,  $S=0,11$  мм/об,  $t=0,75$  мм):  $\circ$  –  $E_n$ ;  $\square$  –  $E_3$

Как видно из графика, уже при  $h_3=0,35$  мм,  $E_3=20,1$  мВ и превысило начальное значение  $E_n$ , равное 18,5 мВ. Все это указывает на то, что тепловой режим режущего инструмента стал определяться температурой, действующей на задней поверхности.

## ВЛИЯНИЕ ТЭДС НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Как показал опыт обработки сплавов на никелевой основе, появление оптимальных областей по интенсивности износа режущего инструмента связано не только с конкурирующими воздействиями адгезионного и диффузионного износа, но и со структурно-фазовыми превращениями, происходящими в самом сплаве. Так, например, при обработке сплава ХН77ТЮ резцом ВК8 с различными подачами зависимость длины пути резания от ТЭДС носит сложный характер и имеет два максимума по длине пути резания (рис.10).

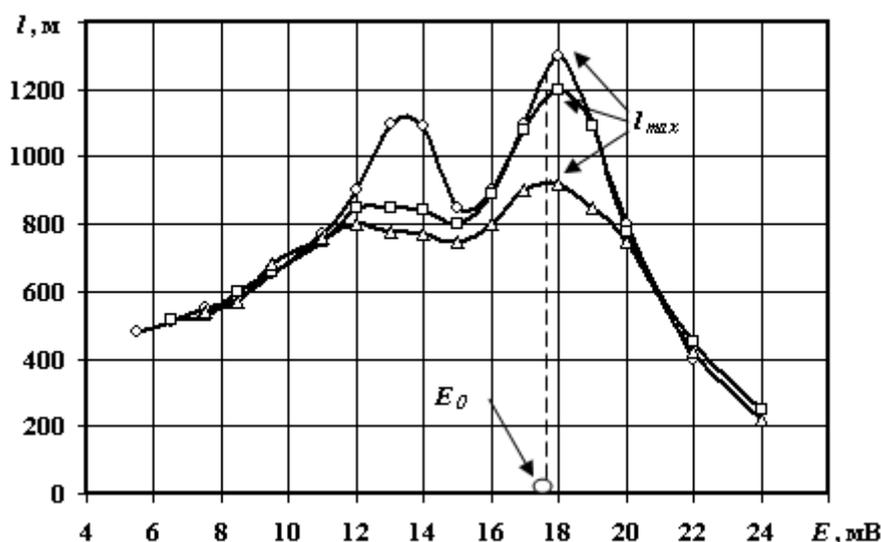


Рис.10 Влияние величины термо-ЭДС на длину пути резания при точении сплава ХН77ТЮ резцом ВК8 ( $V=6...60$  м/мин,  $t=0,5$  мм,  $h_3=0,25$  мм):

◇ –  $S=0,11$  мм/об; □ –  $S=0,21$  мм/об; △ –  $S=0,3$  мм/об

Первый максимум находится в области ТЭДС=13-14 мВ (температур 500-550°C). В этом диапазоне температур наблюдается повышение пластичности данного сплава. Второй максимум – в диапазоне ТЭДС=17-18 мВ и соответствует температурам начала провала пластичности (700-750°C). Обнаруженные автором критические точки на семействе кривых ТЭДС, в зависимости от скорости резания (см. рис.2), могут быть использованы при выборе оптимальных условий обработки других сплавов на никелевой основе.

Установленная взаимосвязь между износом инструмента и поступающим сигналом из зоны резания в виде ТЭДС при обработке сплава ХН77ТЮ выявила необходимость более детального изучения влияния ТЭДС на обрабатываемость всей группы сплавов на никелевой основе.

Автором проведены опыты по оценке износостойкости твёрдосплавных неперегачиваемых пластин с постоянной геометрией режущей части из сплава ВК60М при обработке сплавов на никелевой основе ХН70ВМФТЮ, ХН55ВИТФКЮ, ХН73МБТЮ и ХН51ВМТЮВКР (рис.11).

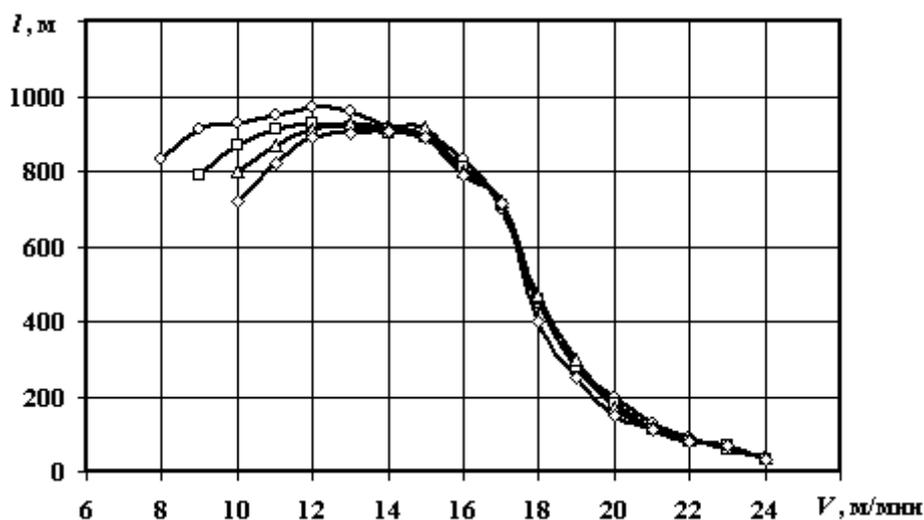


Рис. 11. Влияние величины термо-ЭДС на длину пути резания при точении сплавов на никелевой основе резцом ВК60М ( $V=10\dots 100$  м/мин,  $S=0,11$  мм/об  $t=0,5$  мм,  $h_3=0,5$  мм): О – ХН70ВМФТЮ; □ – ХН73МБТЮ; △ – ХН55ВИТФКЮ; ◇ – ХН51ВМТЮВКР

Установлено, что зависимость длины пути резания от ТЭДС для всей группы сплавов на никелевой основе – экстремальная. Максимум длины пути резания (минимум интенсивности износа) наблюдается в диапазоне от 12 до 13 мВ. Если правая ветвь кривой практически не зависит от марки сплава, то в левой части заметно определённое влияние твёрдости сплавов на никелевой основе на износ пластин из сплава ВК60М: повышение прочности сплава ведёт к более интенсивному снижению длины пути резания.

Независимость длины пути резания от марки сплава на никелевой основе на правой ветви кривой зависимости длины пути резания от ТЭДС лишний раз убеждает нас в правомочности предположения академика В.И. Дикущина о целесообразности оценки обрабатываемости материала по ТЭДС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая поведение зависимостей  $E_n(V)$ , полученных автором при обработке жаропрочных сплавов, можно сделать ряд выводов:

1) поступающий из зоны резания сигнал в виде ТЭДС отражает поведение контактных процессов, происходящих в большей степени на передней поверхности инструмента;

2) независимость поведения ТЭДС от марки инструментального сплава указывает на определенное значение природы формирования адгезионно-когезионного шва, состоящего из продуктов разрушения обрабатываемого материала. Сложный характер изменения зависимости  $E_n(V_c)$ , при широком варьировании содержания Со в твердом сплаве, подтверждает достаточно важную роль поведения физико-механических свойств жаропрочных сплавов под действием температуры в контактном слое стружки;

3) на низких скоростях перемещения стружки, когда адгезионно-когезионный шов находится в фазе упрочнения, и при последующем его разрушении ТЭДС сигнализирует о предельных возможностях любого жаропрочного сплава, находящегося в процессе резания. Независимость ТЭДС от марки жаропрочного сплава в этом диапазоне скоростей перемещения стружки указывает на равенство истинных пределов прочности всей группы жаропрочных сплавов;

4) появление зон стабилизации ТЭДС по мере увеличения скорости перемещения стружки  $V_c$  говорит о фиксации полиморфных превращений, происходящих в сплавах на никелевой основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании.– Горький, Волго-Вятское изд-во, 1975. – 280 с.

2. Праведников И.С., Касимов Л.Н. Теория взаимосвязи явлений процесса резания различных материалов // Проблемы и перспективы современных технологий сервиса: Межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Уфимск. технол. ин-т сервиса, 1998. – С. 139-148.

3. А.С. № 679320. МКл<sup>2</sup> В238 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / Праведников И.С., Самигуллин Р.З (СССР),– Бюл. № 30 // Открытия. Изобретения. – 1979. – с. 40.