

**ФРЕЗЕРОВАНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В ХОЛОДНОМ И
НАГРЕТОМ СОСТОЯНИИ
(ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ)**

А. М. РОЗЕНБЕРГ, К. А. НАССОНОВ

В последние годы чрезвычайно широкое применение в разнообразных отраслях народного хозяйства получили кислотоупорные, нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы. Необходимость в этих металлах увеличивается во все возрастающих масштабах. Однако механическая обработка резанием высоколегированных сталей связана с большими трудностями, а некоторые из них совершенно не поддаются обработке резанием обычным методом.

Поэтому изучение вопроса обрабатываемости высоколегированных сталей приобретает значительный практический и теоретический интерес.

В настоящей работе приводятся в сжатом виде результаты исследования обрабатываемости нержавеющей аустенитной стали IX 18Н9Т (сталь ЭЯТ) при торцевом фрезеровании ее быстрорежущими и твердосплавными фрезами в холодном и нагретом состоянии [7].

Опыты по фрезерованию холодной стали быстрорежущими фрезами проводились при охлаждении пятипроцентным раствором эмульсола в воде.

При этом для изготовления ножей торцовых фрез использовались кованая быстрорежущая сталь Р18 и литые быстрорежущие стали с присадками кобальта, серы, титана.

Лучшие результаты были получены при использовании кованой быстрорежущей стали Р18, причем оптимальная геометрия ножа фрезы характеризовалась следующими параметрами: $\gamma_N=22-28^\circ$, $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $\varphi=55-60^\circ$, $\varphi_1=10^\circ$, $\lambda=30-35^\circ$; $r=0,5-0,7$ мм (радиус при вершине резца может быть заменен переходной фаской с углом в плане 20° и шириной 1 мм). Исследование влияния скорости резания на стойкость быстрорежущей фрезы показало, что наибольший практический интерес представляет использование скоростей резания, не превышающих 15 м/мин.

Опытами по фрезерованию стали IX18Н9Т в холодном состоянии инструментом, оснащенным пластинками твердых сплавов ВК8, Т5К10 и Т15К6 установлено, что обработка этой стали затруднена. Об этом свидетельствует сравнительно низкий уровень стойкости фрезы. Так, при фрезеровании со скоростью 110 м/мин. ($S_z=0,126$ мм/зуб; $t=2,5$ мм) стойкость фрезы, оснащенной сплавом ВК8, составляла 39 минут, а со скоростью 170 м/мин.—лишь 15 минут.

Изменение скорости резания в пределах $50 \div 160$ м/мин при той же подаче и глубине резания сопровождалось изменением стойкости фрезы, оснащенной сплавом Т5К10, от 80 до 30 мин. Твердый сплав Т15К6 оказался совершенно непригодным для фрезерования стали IX18Н9Т в холодном состоянии. В этом случае получились очень низкие стойкости, не превышающие 10 мин., так как в силу хрупкости режущая кромка выкрашивалась до образования нормального износа на задней поверхности.

Низкая обрабатываемость стали IX18Н9Т связана с ее физическими свойствами, а именно с высокой вязкостью, большим показателем упрочнения, низкой теплопроводностью. В результате этих свойств обрабатываемой стали режущая кромка твердосплавной фрезы выкрашивалась, что вело к быстрому разрушению инструмента, ухудшению чистоты обработанной поверхности вследствие появления на ней задиров, к повышению силы резания.

Лучшие результаты в случае фрезерования нержавеющей стали IX8Н9Т в холодном состоянии были получены при следующих оптимальных значениях геометрических параметров ножа фрезы:

Твердый сплав	Главный угол в плане	Передний угол	Задний угол
ВК8	55°	12°	11—13°
Т5К10	55°	11—12°	14—16°

Угол наклона режущей кромки был принят равным 7°.

Для сплава Т15К6 широкое изменение скорости резания, подачи, геометрии ножа фрезы не давало эффекта и не предотвращало выкрашивания режущей кромки.

Известно [1, 2, 6, 10, 11 и др.], что одним из методов, позволяющих производительно обрабатывать стали, является обработка их в нагретом состоянии. Однако большинство исследований в этой области носит случайный характер. Очень часто вопрос о возможности улучшения обрабатываемости сталей путем резания их в нагретом состоянии решался односторонне, при этом не охватывался весь комплекс основных характеристик обрабатываемости.

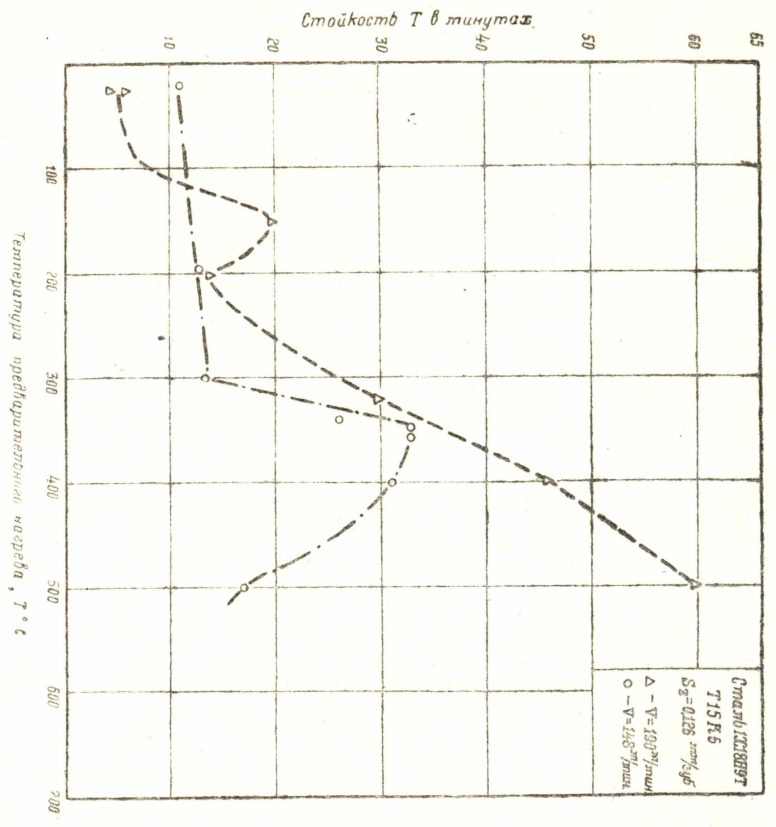
В наших опытах по фрезерованию нагретой нержавеющей стали нагрев стальных брусков осуществлялся в электрической печи, после чего они крепились к столу станка с помощью специального приспособления.

Контроль за температурой нагрева поверхности обрабатываемых брусков осуществлялся термошупом (искусственная термопара медь—константан). Ширина фрезеруемой поверхности принималась равной 80 и 170 мм, глубина резания—2,5 мм.

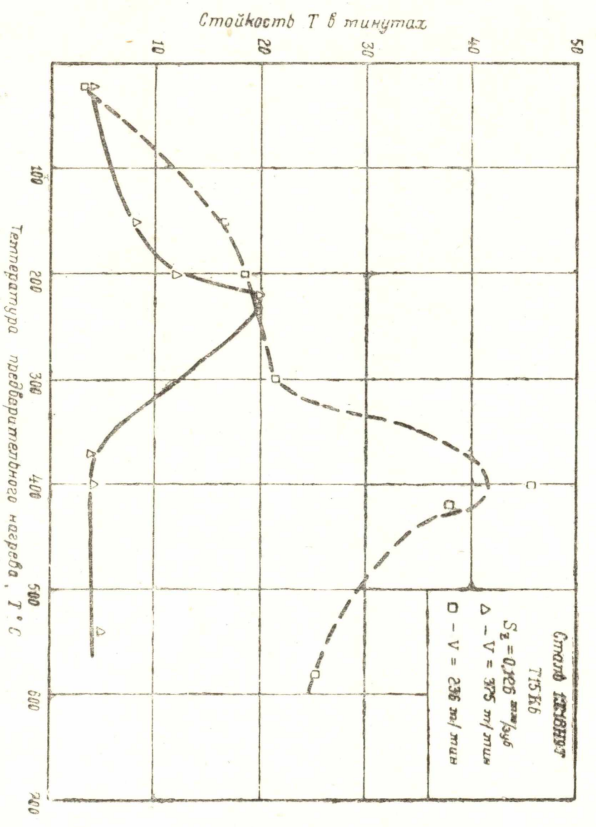
Влияние температуры предварительного нагрева стали на стойкость твердосплавных фрез, оснащенных твердыми сплавами Т15К6, ВК8 и Т5К10, представлено на фиг. 1, 2 и 3.

Как показывают графики фиг. 1, 2 и 3, предварительный нагрев стали IX18Н9Т позволяет в ряде случаев значительно повысить стойкость фрез. Однако изменение стойкости режущего инструмента с повышением температуры нагрева стали происходит не монотонно, а по кривым, имеющим максимум.

Для конкретного режима обработки (скорости резания и подачи) существует интервал ($\pm 20^\circ\text{C}$) температур предварительного нагрева



Фиг. 1.

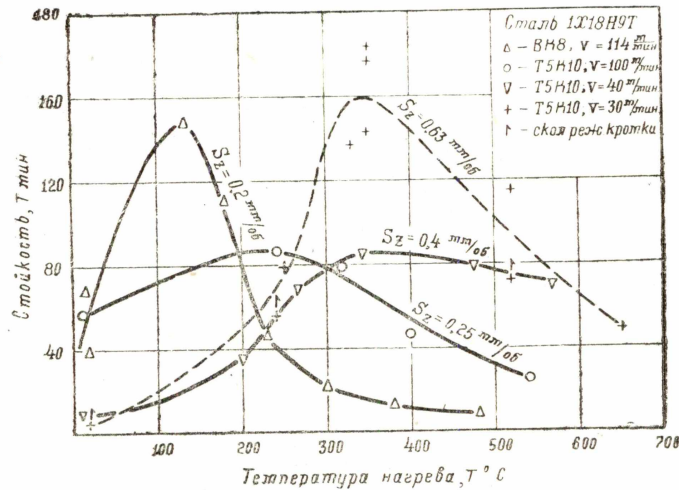


Фиг. 2.

нержавеющей стали, в области которого стойкость фрезы достигает наибольшего значения по сравнению со стойкостью при иных опытных температурах. Температуру нагрева стали, при которой стойкость фрезы достигает наибольшего значения, мы называем „оптимальной температурой“ нагрева стали.

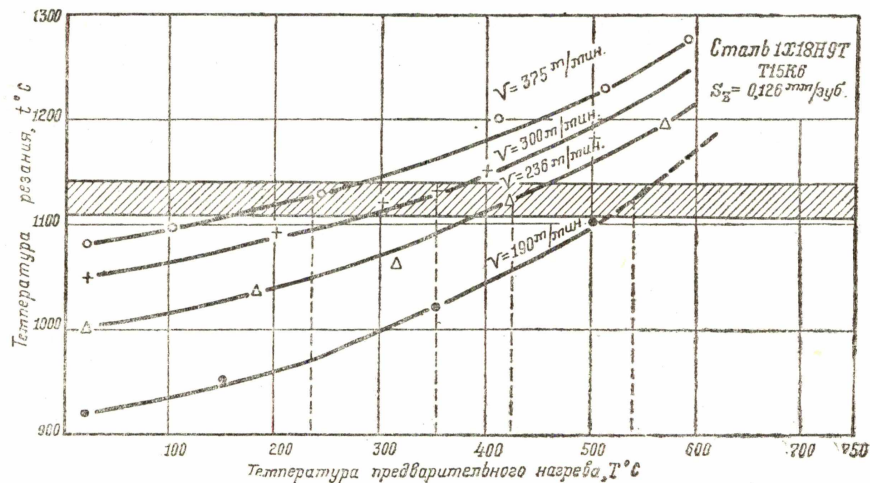
Опыты, кроме того, показывают, что с увеличением скорости резания оптимальная температура сдвигается в область более низких температур предварительного нагрева.

С целью более полного изучения полученных зависимостей нами были проведены специальные температурные исследования, в кото-



Фиг. 3.

рых методом естественной термопары с помощью осциллографа МПО-2 замерялась температура резания. Некоторые результаты исследования представлены на фиг. 4.



Фиг. 4.

Совместное рассмотрение фиг. 1, 2 и 4 показывает, что оптимальной температуре предварительного нагрева стали, когда наблюдается максимум стойкости режущего инструмента, оснащенного сплавом Т15К6, соответствует вполне определенная, постоянная для всех исследуемых скоростей температура резания, несколько превышаю-

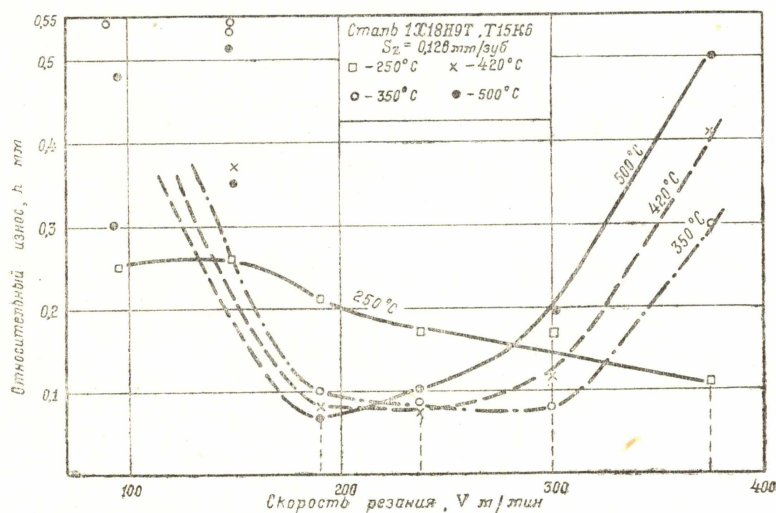
щая 1100°C. Опыты, проведенные при иных значениях скорости резания, удовлетворительно увязываются с результатами, представленными на фиг. 1, 2 и 4¹⁾

Мы предполагаем, что наличие максимумов стойкости при определенном температурном режиме, достигнутом изменением скорости резания и температуры нагрева обрабатываемой стали, связано прежде всего с изменением физико-механических свойств твердосплавного режущего инструмента в различных температурных условиях. В частности, титановые твердые сплавы, как показывают специальные исследования [3, 4, 5], склонны при их нагреве к весьма значительному (от трех до восьми раз) увеличению ударной вязкости.

По всей видимости, возрастание ударной вязкости при определенном температурном режиме у титанового сплава Т15К6 и приводит к наличию максимумов стойкости, отмеченных на фиг. 1 и 2.

Во всех случаях, когда температурный режим соответствовал максимумам стойкости, мы наблюдали равномерный, постепенно нарастающий износ с образованием фаски износа по задней поверхности. В случае же отступления от указанного режима, как правило, процесс нормального износа прерывался сколами режущей кромки.

Предварительный нагрев стали IX18H9T вносит изменение в процесс износа фрезы не только посредством температурного режима, который влияет на свойства материала инструмента, при этом изменяются свойства и самого обрабатываемого материала. С нагревом монотонно уменьшаются твердость стали, временное сопротивление, условный предел текучести, показатель политропы сжатия [9]. Весьма



Фиг. 5.

значительное изменение с нагревом стали IX18H9T ее физико-механических характеристик, естественно сопровождается и изменением ее „истирающей способности“ [12]. Наиболее правильным показателем „истирающей способности“ обрабатываемого материала следует считать интенсивность износа режущего инструмента. На фиг. 5 показа-

1) В области скоростей резания меньших 150 м/мин. для сплава Т 5К6 нами обнаружен второй максимум стойкости, который находит проявление при температурах резания, не превышающих 95°C, причем величина этой температуры зависит от скорости резания. Рамки настоящей статьи не позволяют привести дополнительный экспериментальный материал.

на зависимость величины относительного износа (нарастание ширины фаски износа по задней поверхности за сто метров пути резца под стружкой) от скорости резания для четырех различных температур нагрева стали.

Из приведенного графика видно, что для постоянной температуры нагрева стали существует оптимальная скорость резания, при которой интенсивность износа достигает минимального значения. При оптимальной скорости резания при всех опытных температурах нагрева стали мы наблюдаем равномерный износ по задней поверхности ножа фрезы, достаточную стабильность его, так как именно в этом случае достигался тот „благоприятный“ температурный режим, при котором режущие свойства твердого сплава имели наиболее высокие показатели (повышенная ударная вязкость). Отступление от оптимальной скорости в область меньших скоростей, как правило, сопровождалось появлением сколов режущей кромки, следствием чего является большой разброс экспериментальных точек для скоростей, меньших 150 м/мин.

Увеличение же скорости резания выше оптимальной также приводит к возрастанию относительного износа, вследствие обычного влияния скорости на процесс износа режущего инструмента. Из того же рисунка следует, что с увеличением температуры предварительного нагрева стали наблюдается закономерный сдвиг оптимальных скоростей резания в область меньших скоростей, так как естественно, что достичь „благоприятный“ температурный режим для более высокой температуры нагрева стали можно при меньшей скорости резания.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что по мере повышения температуры предварительного подогрева стали минимум относительного износа не только смещается в область меньших скоростей резания, но и приобретает при этом все меньшие абсолютные значения. Это иллюстрирует табл. 1, где приведены значения минимального относительного износа, соответствующие оптимальным скоростям резания при различных температурах нагрева стали. Табл. 1 составлена по тем же опытным данным, что и фиг. 5.

Таблица 1

Температура нагрева стали Т°С	250	350	420	500
V опт. м/мин	375	300	236	190
$h_{\text{отн.}}^{\text{min}}$ м.м	0,110	0,082	0,075	0,067

В снижении величины относительного износа с увеличением температуры нагрева проявляется, по нашему мнению, влияние изменяющихся с нагревом стали ее физико-механических свойств и прежде всего „стирающей способности“.

Стойкостные испытания, проведенные с использованием твердых сплавов ВК8 и Т5К10, качественно достаточно удовлетворительно увязываются с результатами, полученными для твердого сплава Т15К6 [7].

В табл. 2 приведены результаты некоторых опытов, в которых режущие свойства исследуемых твердых сплавов проявились с лучшей стороны. В табл. 2 указаны марки твердого сплава, режим обработки, температура предварительного подогрева, полученная при этой температуре, стойкость фрезы, ее сравнение со стойкостью при холодной обработке, производительность соответствующего режима в единицу времени (из расчета на один зуб фрезы), которая характеризует-

Таблица 2

Материал инструмента	Скорость резания, V м/мин.	Подача на зуб, $S_z \frac{мм}{зуб}$	Температура нагрева стали, $^{\circ}C$	Стойкость фрезы по машинному времени, Т.мин.	Увеличение стойкости с нагревом, раз	Минутная подача, $S_{\frac{мм}{мин}}$	Произв. периода стойкости, $см^3$	$\frac{B}{D}$
BK8	45	0,126	20	85		19		
	45	0,126	130—150	227	2,7	19	880	0,85
	70	0,2	20	140		23,5		
	70	0,2	130—150	360	2,6	23,5	1670	0,4
	28	0,63	20	20		60		
	28	0,63	350	42	2	60	500	0,8
T15K6	190	0,126	20	5		37,5		
	190	0,126	500	60	12	37,5	450	0,4
	236	0,126	20	5		47,5		
	236	0,126	400	40	8	47,5	375	0,4
T5K10	30	0,63	20	5		60		
	30	0,63	350	160	32	60	1950	0,8
	40	0,4	20	5		47,5		
	40	0,4	350	95	18	47,5	860	0,8
	100	0,126	20	75		37,5		
	100	0,126	220	100	1,3	37,5	750	0,8

Национальный архив
Института ТПИ
№

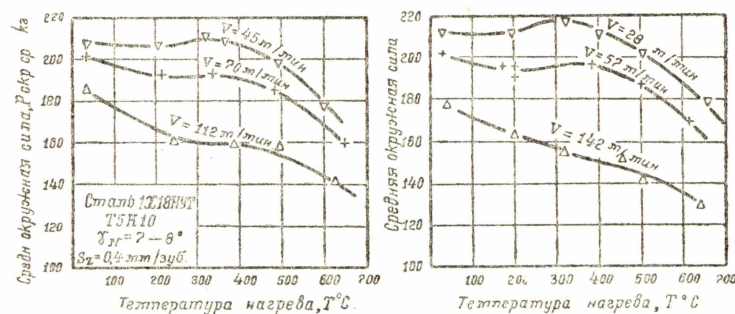
ся минутной подачей и, наконец, производительность периода стойкости, характеризуемая объемом металла, снятого ножом фрезы до его затупления при фрезеровании нагретой стали. В приводимой таблице указано также отношение ширины фрезеруемой поверхности (В) к диаметру фрезы (D), имевшее место в опытах.

Приведенные в табл. 2 результаты исследований показывают, что при фрезеровании нагретой нержавеющей стали твердосплавными фрезами возможно значительно повысить стойкость режущего инструмента по сравнению с холодной обработкой. Это возрастание стойкости по данным таблицы колеблется в пределах от 1,3 до 32 раз.

Лучшие результаты из трех марок твердых сплавов были получены при использовании сплава Т5К10. В этом случае была достигнута наиболее высокая производительность при оптимальных температурах нагрева нержавеющей стали, сравнительно небольших скоростях резания и крупных подачах на зуб.

Стойкость режущего инструмента является решающим, но не единственным показателем обрабатываемости. Остановимся на второй характеристике обрабатываемости, а именно, на характере динамических зависимостей, наблюдаемых в процессе обработки резанием нагретой нержавеющей стали.

На фиг. 6 представлена зависимость средней окружной силы при торцевом фрезеровании стали IX18H9T в зависимости от температуры ее нагрева, а на фиг. 7 подобная же зависимость главной составляю-



Фиг. 6.

щей силы резания при точении нержавеющей стали. Опыты были проведены с различными скоростями резания, при которых нарост отсутствовал.

Из приведенных на фиг. 6 и 7 графиков следует, что для различных скоростей резания сила резания может возрастать, уменьшаться или сохранять примерно постоянное значение в определенном интервале температур нагрева стали.

Проследим за тем, от каких факторов зависит величина главной составляющей силы резания. В общем виде для главной составляющей силы резания можно написать следующую функциональную зависимость:

$$P = \Phi(\sigma, \epsilon, f),$$

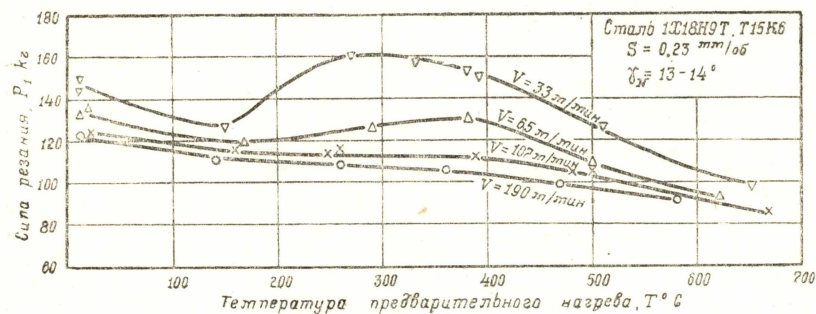
где: σ — прочностная характеристика стали;

ϵ — степень пластической деформации срезаемого слоя;

f — площадь срезаемого слоя металла.

Переходя к удельной силе резания или сохраняя постоянным сечение среза, можно заметить, что на величину силы резания одновременно могут оказывать влияние два фактора, самостоятельно изменяющихся с нагревом стали. Это, во-первых, разупрочнение стали в результате снижающихся с предварительным нагревом прочностных характеристик ее, во-вторых, влияние изменяющейся с нагревом стали степени пластической деформации срезаемого слоя.

В табл. 3 представлены значения физико-механических характеристик стали при различных температурах нагрева. Здесь даны значения условного предела текучести (σ_0), показатели политропы напряже-



Фиг. 7.

ний (n) при сжатии, твердости по Бюнелю (H_B), полученные нами в специальных опытах, а также приведены значения временного сопротивления (σ_B) при различных температурах нагрева стали IX18H9T по данным Шмыкова А. А. [13].

Таблица 3

$T, ^\circ\text{C}$	20	150	300	400	500	700	800	900
$\sigma_{вр} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	66	—	—	48,7	—	30,3	18,3	10
$\sigma_0 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	88	78	66	65	59	—	—	—
n	0,47	0,40	0,37	0,35	0,3	—	—	—
H_B	167	138	125	114	110	92	—	—

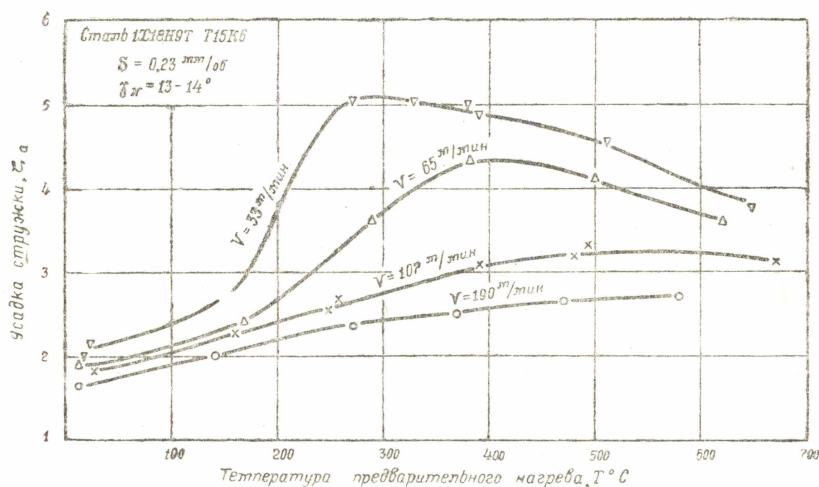
Анализ данных табл. 3 показывает, что с повышением температуры нагрева стали происходит монотонное снижение всех приведенных физико-механических характеристик.

За изменением степени пластической деформации срезаемого слоя проследим по изменению усадки стружки (фиг. 8) при различных скоростях резания и температурах нагрева стали. Из приведенного рисунка видно, что для скорости резания 33 м/мин резко выражаемый максимум усадки стружки наблюдается в области температур нагрева стали $280-300^\circ$.

С увеличением скорости резания максимум кривых сдвигается в область более высоких температур нагрева стали, а абсолютное значение его уменьшается. Можно предполагать, что совместным влиянием изменяющейся с нагревом стали степени пластической деформации стружки и разупрочнением стали с нагревом обуславливается характер силовых зависимостей.

Так, для скорости резания 33 м/мин при нагреве стали до 300° ее прочностные характеристики снижались, но сила резания все же возрастала ввиду преобладающего влияния сильно увеличивающейся при этом степени пластической деформации (усадка увеличилась примерно в 2,5 раза), а снижение прочностных характеристик сказалось лишь в замедленном росте силы резания. А при скорости резания 190 м/мин , хотя усадка стружки с повышением температуры нагрева стали и возрастала ввиду преобладающего влияния снижающихся при этом прочностных характеристик, наблюдалось уменьшение силы резания.

На фиг. 9 и 10 соответственно приведены зависимости коэффициента трения и температуры резания от температуры нагрева стали



Фиг. 8.

при различных скоростях резания. Эти зависимости получены в тех же опытах, что и результаты, представленные выше на фиг. 7 и 8.

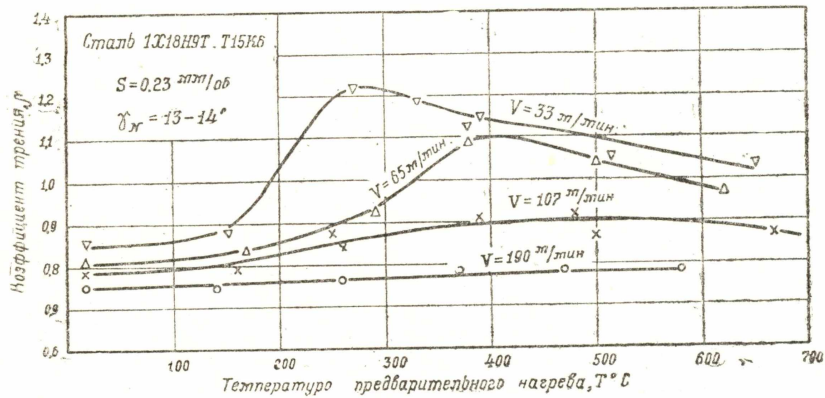
Анализ зависимостей, приведенных на фиг. 8, 9 и 10, позволяет сделать вывод о том, что известное в теории резания правило [8], говорящее, что для данного обрабатываемого материала и угла резания режимам одинаковых температур соответствуют одинаковые величины коэффициента трения и усадки стружки, справедливо лишь при обработке резанием малолегированных сталей. Указанное правило не распространяется на процесс резания высоколегированных сталей, в частности стали IX18H9T в нагретом состоянии. Это видно, например, из совместного рассмотрения фиг. 8, 9 и 10, из которых следует, что с повышением температуры резания за счет температуры нагрева стали усадка стружки изменяется по горбообразным кривым. Однако с повышением температуры резания за счет увеличения скорости резания (вертикальные сечения сверху вниз, фиг. 8) усадка уменьшается при всех опытных температурах нагрева стали.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что и при обработке резанием нагретой нержавеющей стали мы в достаточно широком диапазоне изменения условий резания наблюдали однозначную связь усадки стружки и коэффициента трения. Всегда изменение усадки стружки качественно следовало за соответствующим изменением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью инструмента, что, в частности, можно наблюдать при рассмотрении фиг. 8 и 9 [9].

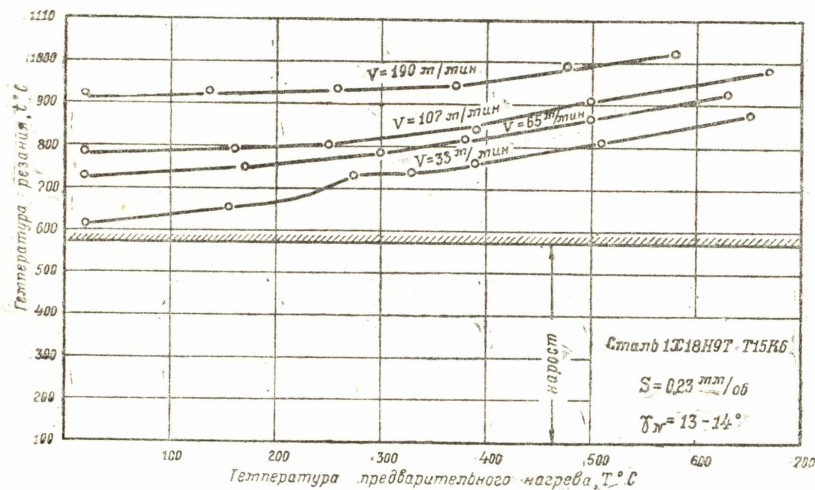
Специальными опытами по исследованию микронеровностей обработанной поверхности установлено, что нагрев нержавеющей стали

несущественно сказывается на изменении чистоты поверхности при фрезеровании. С повышением температуры нагрева стали IX18H9T наблюдается некоторое снижение величины микронеровностей обработанной поверхности. Для скоростей резания, при которых исключено образование нароста, более заметно это снижение проявляется при меньшей скорости резания, однако чистота поверхности с нагревом стали от 20 до 650°C остается в пределах одного класса чистоты.

Настоящая работа представляет собой результат комплексного исследования возможности улучшения обрабатываемости нержавеющей стали IX18H9T путем обработки ее резанием в нагретом состоянии.



Фиг. 9.



Фиг. 10.

При этом были подвергнуты изучению три основных показателя обрабатываемости: величина стойкости режущего инструмента, величина силы и мощности, затрачиваемых при резании, чистота обработанной поверхности.

В результате проведенных исследований выявлена возможность улучшения обрабатываемости стали IX18H9T путем обработки ее в нагретом состоянии методом торцевого фрезерования твердосплавным инструментом. В работе указаны режимы обработки, при которых удается значительно повысить стойкость фрез путем обработки стали IX18H9T в нагретом состоянии, приводятся зависимости окружной си-

лы при фрезеровании и главной составляющей силы резания при точении нержавеющей стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Армстронг Э. Т. и др. Обработка резанием нагретых металлов. Прикладная механика и машиностроение, № 2, 1952.
2. Аскинази Б. М., Бабат Г. И. Обработка металлов при индукционном нагреве токами высокой частоты. Вестник металлопромышленности, № 10—11, 1939.
3. Брохин И. С. Физико-механические свойства металлокерамических твердых сплавов при высоких температурах. Вестник металлопромышленности, № 14—15, 1936.
4. Брохин И. С. Современные отечественные инструментальные твердые сплавы и их свойства. Скоростные методы обработки металлов. МОНИТОМАШ, Машгиз, 1949.
5. Бруштейн Б. Е. Режущие свойства сергонита в зависимости от его структуры. Оборонгиз, 1940.
6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том III, Томск, 1944.
7. Нассонов К. А. Скоростное фрезерование стали ЭЯТ в нагретом состоянии. (Исследование обрабатываемости). Диссертация. Томск, 1954.
8. Розенберг А. М., Еремин А. Н. К теории процесса резания металлов. Станки и инструменты, № 10, 1949.
9. Розенберг А. М., Нассонов К. А. Факторы, влияющие на процесс деформации при резании. Известия ТПИ, том 85, 1957.
10. Рукавишников В. И. Обработка деталей в горячем состоянии. Машиностроитель № 7, 1936.
11. Тур С. Обработка горячего металла. Metal progress. Июнь, 1951.
12. Фельдштейн Э. П. Обрабатываемость сталей. Машгиз, 1953.
13. Шмыков А. А. Справочник термиста. Гос. научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва, 1952.