

М. А. АРАНЗОН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТОЧЕНИЕМ
ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ ЭИ654Ш

Исследуемый обрабатываемый материал представляет собой жаропрочную сталь аустенитного класса, полученную методом электрошлакового переплава. Физико-механические свойства ее приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства стали ЭИ654Ш
(температура 20°C)

σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	ψ , %	E , кг/мм ²	λ , кал. см. сек. °C	C_p , кал. г. °C	γ_0 , г/см ³
77	50	50	65	18000	0,029	0,12	7,51

Как видно из таблицы 1, для стали ЭИ654Ш характерно большое отношение $\frac{\delta}{\sigma_b}$, которое составляет примерно 0,65 и свидетельствует о большой ее пластичности. Обращает на себя внимание низкая теплопроводность стали ЭИ654Ш (в 3—4 раза меньшая, чем у нелегированных углеродистых сталей), равная примерно теплопроводности жаропрочных сплавов на никелевой основе. Низкая теплопроводность стали ЭИ654Ш способствует увеличению доли тепла, уходящего в резец, и возникновению высоких температур на поверхно-

стях контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой, что отрицательно влияет на его износ и стойкость.

Большое значение для производительного резания жаропрочных сталей и сплавов имеет правильный выбор оптимальной марки материала инструмента.

Исследования и производственный опыт непрерывного точения жаропрочной стали ЭИ654Ш показывают, что проблема повышения производительности на токарных операциях может быть решена только применением твердосплавных резцов. Бесперспективным в этом отношении является использование резцов из быстрорежущих сталей, в том числе и новых марок (Р9К5, Р9Ф5, Р18Ф2М и т. д.). Поэтому определение оптимальной марки инструментального материала производилось для резцов, оснащенных различными марками твердого сплава: ВК6М, ВК8, ВМ8, Т15К6, ТТ10К8Б.

Резцы, оснащенные указанными марками твердого сплава, сопоставлялись по графикам износа (критерий притупления $\omega = 0,65$ мм) и имели следующие оптимальные геометрические параметры: $\gamma = 10^\circ$; $\gamma_f = -5^\circ$; $\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\lambda = 10$; $f = 0,3$ мм; $r = 0,8$ мм.

Согласно данным, приведенным в таблице 2, лучший результат по стойкости даст твердый сплав Т15К6, за ним следуют твердые сплавы ВК6М, ВМ8, ВК8 и ТТ10К8Б.

Таблица 2

Стойкость резцов, оснащенных твердым сплавом различных марок при точении жаропрочной стали ЭИ654Ш ($v = 62$ м/мин; $F = 2 \times 0,3$)

Марка твердого сплава	ВК6М	ВК8	ВМ8	Т15К6	ТТ10К8Б
Стойкость, мин.	24	19	22	40	14,5
Относительный коэффициент	1,0	0,79	0,92	1,66	0,58

Однако как показывают исследования и практика работы резцами, оснащенными твердым сплавом Т15К6, износ их обычно сопровождается выкрашиванием режущей кромки и часто не достигает критерия притупления в результате выхода резца из строя. Для резцов, оснащенных другими мар-

ками твердого сплава, выкрашивание режущей кромки не является характерным и случается очень редко.

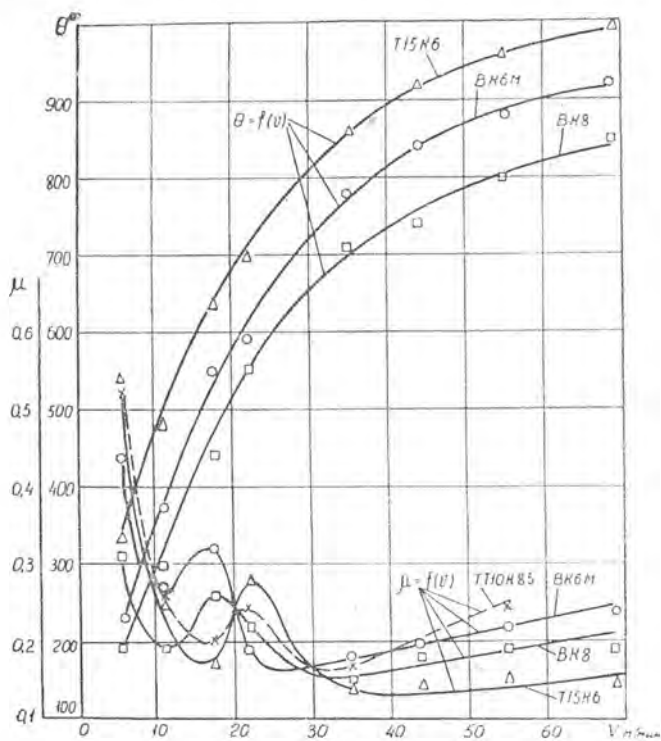
Такой характер износа сплава Т15К6 объясняется его более низкой теплопроводностью, большим химическим сродством с обрабатываемым материалом (что выражается в его большей способности к адгезионным процессам) и меньшей изгибной прочностью, чем сопоставимые с ним твердые сплавы. Кроме того, длина контакта стружки с передней поверхностью для резцов Т15К6 в 1,5 раза меньше, чем для резцов ВК6М, что приводит к более высоким удельным контактным давлениям при работе резцами Т15К6. Поэтому при точении стали ЭИ654Ш целесообразно применять резцы, оснащенные твердым сплавом ВК6М, которые хотя и обладают меньшей стойкостью по сравнению с резцами Т15К6, но сохраняют лучшую остроту и устойчивость режущей кромки без выкрашивания на протяжении всего периода резания.

Исследованиями установлено, что новая марка твердого сплава ВМ8 (с молибденом) по своим режущим свойствам примерно равноценна твердому сплаву ВК6М. При работе резцами, оснащенными твердым сплавом ВМ8, наблюдается некоторое увеличение интенсивности износа по передней поверхности по сравнению с резцами ВК6М. В связи с этим образующаяся при точении резцами ВМ8 лунка по передней поверхности прорывает режущую кромку быстрее, чем износ по задней поверхности достигает установленного критерия притупления $\omega = 0,65$ мм. Исходя из этих соображений, при работе резцами с твердым сплавом ВМ8 критерий притупления должен быть занижен до величины $\omega = 0,55 - 0,6$ мм. Что касается резцов, оснащенных титанотанталовым твердым сплавом марки ТТ10К8Б, то ввиду малой стойкости они не могут быть рекомендованы для точения жаропрочной стали ЭИ654Ш, хотя не исключена возможность их использования при прерывистом резании, на что имеются указания в литературе.

Метод определения оптимальной марки твердого сплава с помощью стойкостных исследований является трудоемким и требует значительных затрат времени и обрабатываемого материала. Перспективным в этом отношении является метод, основанный на моделировании процесса трения [1, 2, 5].

Трение перемещающихся в осевом направлении пуансонов, оснащенных различными марками твердого сплава, по вращающейся заготовке осуществлялось на моделирующей установке, где происходило одновременное осциллографиро-

вание силы трения, нормальной силы и контактной температуры. Используя полученные данные, можно построить графики зависимости коэффициента трения μ и температуры трения Θ от скорости относительного скольжения (фиг. 1).



Фиг. 1. Зависимость коэффициента трения и температуры от скорости относительного скольжения трущейся пары «сталь марки ЭИ654Ш — твердые сплавы».

Коэффициенты трения для различных трущихся пар, как следует из графиков, в скоростном диапазоне $V = 5.5 \div 69.2$ m/min изменяются в сравнительно небольших пределах от $\mu = 0.3 - 0.55$ до $\mu = 0.15 - 0.25$, несмотря на сильное возрастание температур от $\Theta = 220 - 350^{\circ}C$ до $\Theta = 850 - 1000^{\circ}C$, что объясняется, очевидно, незначительным изменением при высоких температурах предела прочности на срез (связанного с коэффициентом трения) жаропрочной стали ЭИ654Ш.

Согласно расположению температурных кривых во всем диапазоне скоростей температуры трения для твердого сплава Т15К6 выше на 80—160°C, чем для твердых сплавов ВК6М и ВК8. Указанная разница температур трения контактирующих пар дает основание заключить, что твердые сплавы ВК6М и ВК8 должны дать лучший результат при точении стали ЭИ654Ш. Большее химическое сродство твердого сплава Т15К6 с обрабатываемым материалом по сравнению со сплавами ВК6М и ВК8 приводит к интенсификации процесса схватывания, которая в свою очередь проявляется сильнее при более высоких температурах и отрицательно сказывается на режущих свойствах сплава. Это подтверждается стойкими исследованиями.

Несмотря на то, что твердый сплав ВК8 дает температуру ниже, чем сплав ВК6М, предпочтение необходимо, однако, отдать второму, так как он обладает мелкозернистой структурой и большей твердостью $HRA = 90 \text{ кг/мм}^2$ при одинаковой изгибной прочности $\sigma_{изг} = 130 \text{ кг/мм}^2$.

Как показал проф. Н. И. Резников [2], сопоставление температур трения для различных трущихся пар «твердый сплав — обрабатываемый материал» можно произвести расчетным путем, используя формулу для определения средней температуры трения на контактных поверхностях, которая после некоторых преобразований может быть представлена в следующем виде:

$$\Theta_{ср} = \frac{C \cdot \mu_{ср}}{A_{п} + A_{з}}, \quad (1)$$

где C — коэффициент, имеющий одинаковое значение для всех твердых сплавов при одних и тех же условиях резания;

$\mu_{ср}$ — средний коэффициент трения на площадке контакта;

$A_{з}$, $A_{п}$ — коэффициенты аккумуляции тепла заготовки и пуансона;

т. е.

$$A_{з} = V \sqrt{\lambda_{з} \cdot C_{рз} \cdot \gamma_{оз}}; \quad A_{п} = V \sqrt{\lambda_{п} \cdot C_{рп} \cdot \gamma_{оп}},$$

где $\lambda_{з}$, $\lambda_{п}$ — теплопроводности заготовки и пуансона,

$$\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек}}; \quad ;$$

$C_{рз}$, $C_{рп}$ — удельные теплоемкости материалов заготовки и пуансона, $\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{°C}}$;

$\gamma_{ос}, \gamma_{об}$ — удельные веса материалов заготовки и пуансона,
 $\frac{z}{\text{см}^3}$.

Используем формулу (1) для расчета отношения температур трения в случае обработки жаропрочной стали ЭИ654Ш. Из графиков на фиг. 1 для $V=44$ м/мин имеем:

$$\mu_{ВК6М} = 0,19; \mu_{ВК8} = 0,17; \mu_{Т15К6} = 0,15.$$

Подсчитаем коэффициенты аккумуляции тепла для заготовки из стали ЭИ654Ш и твердых сплавов:

$$A_z = \sqrt{0,29 \cdot 0,12 \cdot 7,51} = 0,162;$$

$$A_{ВК6М} = \sqrt{0,145 \cdot 0,042 \cdot 14,8} = 0,3;$$

$$A_{ВК8} = \sqrt{0,14 \cdot 0,04 \cdot 14,4} = 0,283;$$

$$A_{Т15К6} = \sqrt{0,065 \cdot 0,053 \cdot 11,1} = 0,195.$$

Отношение температур трения для Т15К6 и ВК6М составляет:

$$\frac{\theta_{Т15К6}}{\theta_{ВК6М}} = \frac{0,15 (0,3 + 0,162)}{0,19 (0,195 + 0,162)} = 1,04.$$

По данным, взятым из опытов по моделированию, это отношение равно

$$\frac{\theta_{Т15К6}}{\theta_{ВК6М}} = \frac{920}{840} = 1,09,$$

что является близким к расчетному значению (разница составляет 4,8%).

Таким же образом, беря отношение температур трения для Т15К6 и ВК8, получим:

$$\frac{\theta_{Т15К6}}{\theta_{ВК8}} = \frac{0,15 (0,283 + 0,162)}{0,17 (0,195 + 0,162)} = 1,12.$$

Из опытов по моделированию это же отношение равно

$$\frac{\theta_{Т15К6}}{\theta_{ВК8}} = \frac{920}{760} = 1,21,$$

что также близко к расчетному значению (разница составляет 8%).

Из изложенного следует, что моделирование процесса трения дает возможность объективно выбрать оптимальную марку твердого сплава экспериментальным определением коэффициентов трения и теоретическим расчетом температурных соотношений.

В результате стойкостных опытов при точении жаропрочной стали ЭИ654Ш резцами с оптимальной маркой твердого сплава ВК6М получены формулы для определения скорости резания в следующем виде:

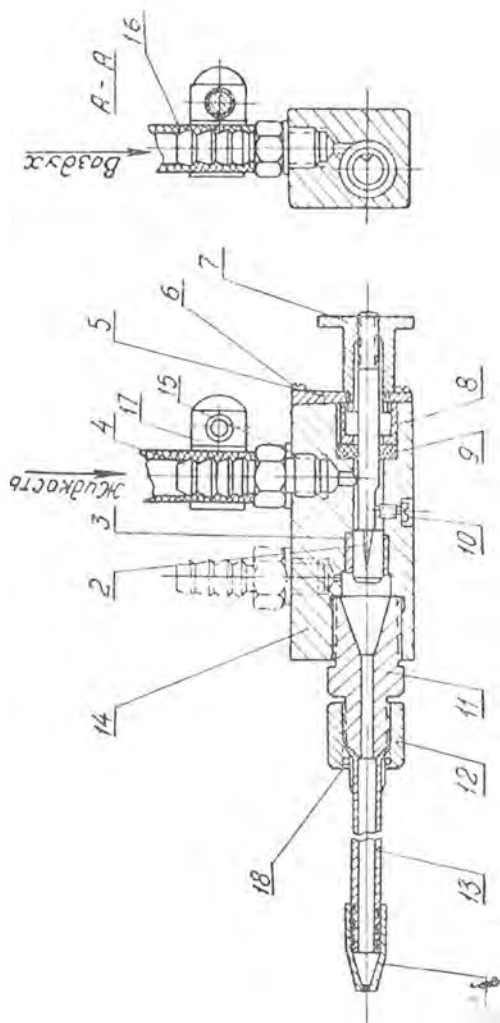
$$v = \frac{182 \cdot K_{\text{охл.}} \cdot K_k}{T^{0,36} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,12}} \text{ — для } S < 0,3 \text{ мм/об.} \quad (2)$$

$$v = \frac{142 \cdot K_{\text{охл.}} \cdot K_k}{T^{0,36} \cdot t^{0,2} \cdot S^{0,31}} \text{ — для } S \geq 0,8 \text{ мм/об.} \quad (3)$$

Поправочный коэффициент K_k вводится в формуле (2) и (3) в случае работы по корке и имеет значение $K_k = 0,8$. Поправочные коэффициенты $K_{\text{охл.}}$, учитывающие влияние метода охлаждения и смазывающе-охлаждающей среды на скорость резания, были найдены специальными исследованиями.

Были исследованы два метода охлаждения: распыленной 1,5%-ой эмульсией и поливом 10%-ой эмульсии при атмосферном давлении. Применявшаяся в исследованиях установка для распыления охлаждающей жидкости представляет собой закрытый резервуар емкостью 10 л, куда заливается жидкость и подается сжатый воздух, давление которого регулируется редуктором. Из резервуара жидкость под воздействием сжатого воздуха, проходя через фильтр, подается по магистрали в распылитель, из которого через сопло попадает на охлаждаемую поверхность инструмента. Конструкция установки мало отличается от конструкций, получивших за последнее время довольно широкое распространение, и в данной статье не приводится. Некоторой особенностью отличается конструкция распылительного устройства, которая изображена на фиг. 2*. Данная конструкция, благодаря тому, что воздух подается по касательной к проходному отверстию (сечение А—А), обеспечивает получение завихренного потока, способствующего стабильной работе распылителя в течение длительного времени.

* Конструкция разработана научно-производственной инструментальной лабораторией Куйбышевского политехнического института.



фиг. 2. Распылитель для водных растворов и эмульсий.

Исследованию влияния охлаждения распыленной жидкостью на стойкость резцов предшествовали опыты по определении оптимального расхода и наиболее рационального способа подвода распыленной жидкости. Результаты опытов приведены в таблице 3, из которой следует:

1) изменение расхода распыленной жидкости в пределах от 100 до 200 $\text{см}^3/\text{час}$ практически не сказывается на стойкости резца;

2) наиболее эффективным способом подвода распыленной эмульсии при точении стали ЭИ654Ш является подвод сверху на переднюю поверхность резца.

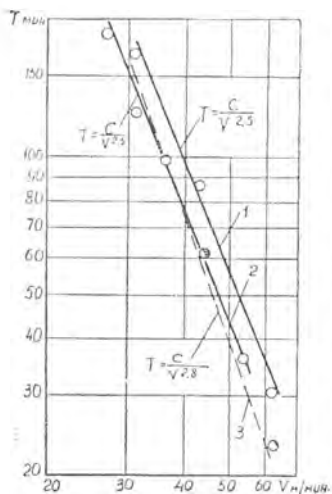
Таблица 3

Стойкость резцов в зависимости от расхода и способа подвода распыленной 1,5%-ой эмульсии; $W = 0,4$ мм; режим резания: $v = 62$ м/мин; $S = 0,3$ мм/об; $t = 2$ мм; давление 2 ат.

Способ подвода	Стойкость в мин. при разных расходах		
	Расход 100 $\text{см}^3/\text{час}$.	Расход 150 $\text{см}^3/\text{час}$.	Расход 200 $\text{см}^3/\text{час}$.
Снизу	8	8	9
Сверху	—	—	17

Проведенное в Куйбышевском политехническом институте под руководством проф. А. Н. Резникова исследование влияния способа подвода охлаждающей среды на тепловые потоки и температуру контактных поверхностей, а также теплофизический анализ происходящих при этом процессов [4] позволяет дать ответ на вопрос о наиболее эффективном способе подвода охлаждения. Результаты этих исследований говорят о том, что главный эффект охлаждения заключается в более интенсивном отводе тепла от стружки в инструмент и в снижении температуры на площадке контакта стружки с передней поверхностью. Поэтому при одинаковых значениях коэффициента теплоотдачи и равных размерах струи более эффективным должен быть способ подвода охлаждения сверху.

Большая стойкость резцов при подводе распыленной жидкости сверху, полученная при точении стали ЭИ654Ш, объяс-



Фиг. 3. Зависимость стойкости резцов ВК6М от скорости резания при точении стали ЭИ654Ш с охлаждением: 1—распыленная 1,5% эмульсией; 2—полив 10% эмульсией; 3—работа всухую. Геометрия резца: $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\gamma_f=-5^\circ$; $\alpha=10^\circ$; $\lambda=10^\circ$; $r=0,8$ мм, сечение среза $F=2 \times 0,3$

поливом 10%-ой эмульсией и работе всухую.

няется вышеуказанными причинами. Подтверждением этому являются произведенные расчеты температур на поверхностях контакта резца со стружкой и изделием методом подвижных источников тепла. В результате было установлено, что температура в зоне контакта стружки с передней поверхностью примерно на $300 \div 400^\circ$ больше, чем на контактной площадке задней поверхности.

Подвод распылительной жидкости снизу, как показали опыты, не дает сколько-нибудь заметного увеличения стойкости резцов по сравнению с работой всухую.

Влияние охлаждения распыленной жидкостью, подаваемой сверху на переднюю поверхность с расходом 200 см^3 в час и давлением 3 ат на скорость резания представлено на фиг. 3 и в таблице 4. На фиг. 3 для сравнения даны также аналогичные зависимости при охлаждении

Таблица 4

Зависимость стойкости резцов, оснащенных твердым сплавом ВК6М, от скорости резания, при охлаждении 1,5%-ой распыленной эмульсией; $w = 0,65 \text{ мл}$

Охлаждение 1,5%-ой распыленной эмульсией	Скорость резания, v , м/мин.	30,8	43,2	62,4
	Стойкость, T , мин.	170	87	30
	Сечение среза	$t \times S = 2 \times 0,3$		
Работа всухую	Скорость резания, v , м/мин.	30,8	42,9	62
	Стойкость, T , мин.	127	62	24
	Сечение среза	$t \times S = 2 \times 0,3$		

Расчет поправочных коэффициентов $K_{\text{охл.}}$ для различных стойкостей резцов, оснащенных твердым сплавом ВК6М, показывает, что применение охлаждения распыленной 1,5⁰/₀-ой эмульсией при точении стали ЭИ654Ш позволяет повысить скорости резания в среднем на 12% по сравнению с работой всухую.

Исследование влияния охлаждения 10⁰/₀-ой эмульсией, подаваемой в виде струи с расходом 7—8 литров в минуту (при атмосферном давлении), на скорость резания показало (фиг. 3), что такой метод охлаждения при точении стали ЭИ654Ш резцами ВК6М практически не дает никакого эффекта. Это подтверждается расчетом поправочных коэффициентов, средняя величина которых для различных стойкостей равна примерно 1,03.

Обычно определение зависимости скорости резания от различных параметров резания осуществляется с помощью стойкостных исследований. В заводских условиях, когда появление большого количества марок труднообрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов требует значительных затрат времени и средств для определения оптимальных режимов резания, изыскание и применение новых сокращенных методов исследования обрабатываемости, позволяющих в короткий срок разработать необходимые рекомендации, приобретают особое значение.

Методика нахождения формулы для скорости резания на базе температурных исследований, которые являются менее трудоемкими и более кратковременными по сравнению со стойкостными исследованиями, может быть использована для решения этой задачи.

В результате проведенных температурных исследований была выведена зависимость температуры резания от основных параметров, которая может быть представлена в следующем виде:

$$\Theta = 281 v^{0,31} \cdot S^{0,09} \cdot t^{0,00} \text{ — для } S < 0,3 \text{ мм/об.} \quad (4)$$

$$\Theta = 323 v^{0,31} \cdot S^{0,18} \cdot t^{0,08} \text{ — для } S \geq 0,3 \text{ мм/об.} \quad (5)$$

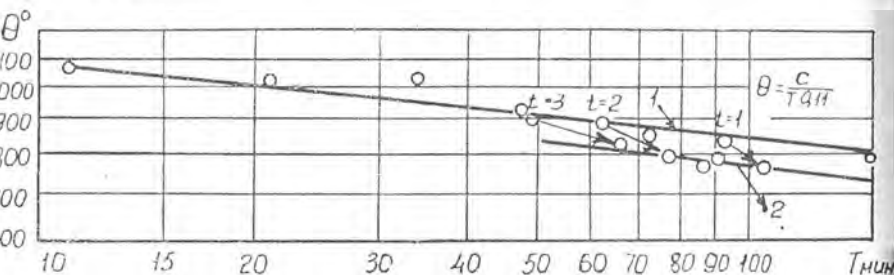
Из формул (4) и (5) можно получить зависимости для скорости резания [2, 6]:

$$v = \left(\frac{\Theta_{\text{доп.}}}{281} \right)^{3,23} \cdot \frac{1}{t^{0,19} \cdot S^{0,29}} \text{ — для } S < 0,3 \text{ мм/об.} \quad (6)$$

$$v = \left(\frac{\Theta_{\text{доп.}}}{323} \right)^{3,23} \cdot \frac{1}{t^{0,26} \cdot S^{0,58}} \text{ — для } S \geq 0,3 \text{ мм/об.} \quad (7)$$

где $\Theta_{\text{доп.}}$ — максимальная температура резания, допустимая для заданной стойкости.

Определение $\Theta_{\text{доп.}}$ связано с проведением небольшого количества стойкостных опытов, на основании которых при наличии данных температурных исследований отыскивается зависимость стойкости реза от температуры резания. Ввиду того, что в двух указанных диапазонах подач имеет место различная степень влияния подачи на температуру резания, определение зависимости «температура—стойкость» необходимо производить отдельно для подач $S < 0,3$ мм/об и $S \geq 0,3$ мм/об.



Фиг. 4. Зависимость стойкости реза от температуры резания при точении стали ЭИ654Ш резцом, оснащенным твердым сплавом ВК6М.
1 — при $S \geq 0,3$ мм/об; 2 — при $S = 0,15$ мм/об.

На фиг. 4 представлен график зависимости стойкости реза от температуры резания. Общая формула, выражающая эту зависимость для двух диапазонов подач, имеет вид:

$$T = \frac{C}{\Theta^\omega} = \frac{C}{\Theta^{9,1}} \quad \text{или} \quad \Theta = \frac{C}{T^{0,11}} \quad (8)$$

Как показано в работе [6], показатель степени ω может быть определен по формуле

$$\omega = \frac{z}{X_\Theta},$$

где z — показатель степени в формуле $T = \frac{C}{v^z}$;

X_Θ — показатель степени при скорости в формуле температуры резания.

В нашем случае $z = 2,8$; $X_\Theta = 0,31$.

Тогда $\omega = \frac{2,8}{0,31} = 9,03$.

Величина ω близко совпадает с величиной, найденной экспериментально (на фиг. 4 $\omega=9,1$). Таким образом, проверкой показателя степени ω , полученного экспериментально, является отношение $\frac{z}{X_{\Theta}}$.

После определения коэффициентов C в формуле (8) получим:

$$\Theta = \frac{1274}{T^{0,11}} - \text{для подач } S < 0,3 \text{ мм/об.} \quad (9)$$

$$\Theta = \frac{1392}{T^{0,11}} - \text{для подач } S \geq 0,3 \text{ мм/об.} \quad (10)$$

Пользуясь этими формулами, можно по заданной стойкости определить соответствующую ей температуру резания, которая может быть использована для подстановки в формулы (6) и (7). Непосредственная подстановка значений Θ из формул (9) и (10) в формулы (6) и (7) вместо $\Theta_{\text{доп.}}$ дает выражения для скорости резания в следующем виде:

$$v_{\Theta} = \left(\frac{1274}{281 T^{0,11}} \right)^{3,23} \cdot \frac{1}{l^{0,19} \cdot S^{0,29}};$$

$$v_{\Theta} = \left(\frac{1392}{323 T^{0,11}} \right)^{3,23} \cdot \frac{1}{l^{0,26} \cdot S^{0,58}}.$$

И окончательно:

$$v_{\Theta} = \frac{132}{T^{0,36} \cdot l^{0,19} \cdot S^{0,29}} - \text{для } S < 0,3 \text{ мм/об.} \quad (11)$$

$$v_{\Theta} = \frac{112}{T^{0,36} \cdot l^{0,26} \cdot S^{0,58}} - \text{для } S \geq 0,3 \text{ мм/об.} \quad (12)$$

Сопоставление скоростей, рассчитанных по формулам, выведенным из стойкостных и температурных зависимостей (при $T=60$ мин), показывает, что расхождение составляет $-11 \div +6\%$.

В настоящее время большое внимание уделяется качеству поверхностного слоя деталей машин после механической обработки как фактору, от которого в значительной степени зависят их эксплуатационные свойства. Особое значение приобретает состояние поверхностного слоя для деталей, изготовленных из жаропрочных сталей и сплавов, которые работают обычно в условиях высокотемпературного режима и знакопеременных нагрузок. Качество поверхностного слоя, характеризуемое знаком и величиной остаточных напряже-

ний, глубиной и интенсивностью наклепанного слоя, а также чистотой обработанной поверхности, обусловлено совместным действием трех факторов: сил резания, температуры и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Исследованиями ряда авторов установлено влияние остаточных напряжений на усталостные характеристики: растягивающие остаточные напряжения резко снижают усталостную прочность, сжимающие — наоборот, ее увеличивают. Поэтому становится весьма актуальной задача регулирования остаточных напряжений путем правильного выбора режимов резания, геометрии инструмента и других факторов.

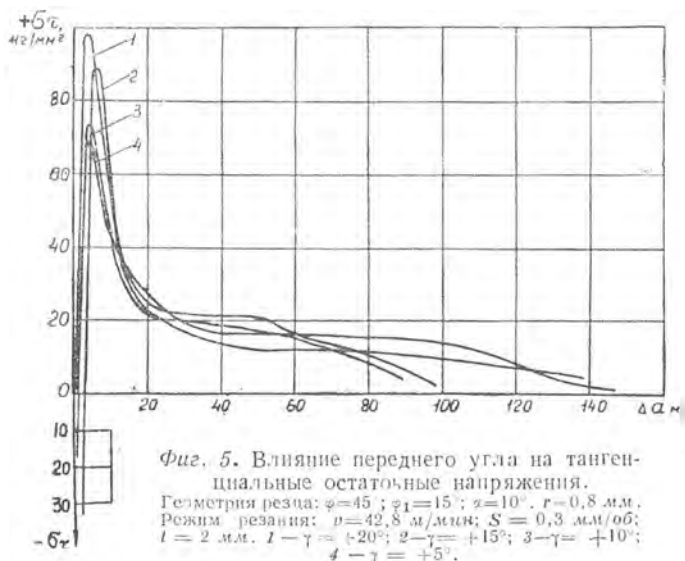
Нами были исследованы тангенциальные остаточные напряжения при точении жаропрочной стали ЭИ654Ш с целью изучения возможности регулирования их интенсивности и глубины распространения. Определение напряжений по глубине поверхностного слоя производилось методом травления разрезанных после обточки колец с непрерывным тензометрированием деформаций аппаратурой, разработанной в КуАИ доцентом Б. А. Кравченко [5].

Изучение остаточных напряжений, возникающих при точении жаропрочных сталей и сплавов, показывает, что наибольшее влияние на их величину и глубину залегания из геометрических параметров инструмента оказывает передний угол, а из параметров резания — скорость.

С изменением переднего угла резца, как известно, изменяются величина и направление равнодействующей силы резания, работа деформации и тепловыделение. Такие изменения в зоне резания, вызывающие в свою очередь изменения температуры резания и коэффициентов трения на передней и задней поверхностях, оказывают влияние на соотношение между сжимающими и растягивающими силовыми полями и их интенсивность [5], а также на температурные напряжения. В конечном итоге изменение переднего угла должно вызвать изменение уровня и глубины залегания остаточных напряжений.

Исследования тангенциальных остаточных напряжений, возникающих при точении жаропрочной стали ЭИ654Ш, подтверждают это положение.

Влияние переднего угла на тангенциальные остаточные напряжения показано на фиг. 5—6. Рассмотрение эпюр на фиг. 5—6 показывает, что при точении стали ЭИ654Ш возникают растягивающие тангенциальные поверхностные напряжения, интенсивность и глубина залегания которых в значи-



degree depend on the magnitude of the cutting angle: with a decrease in the cutting angle the level of stretching residual stresses decreases, and the depth of their penetration increases. Thus, when the cutting angle is reduced from $\gamma = +20^\circ$ to $\gamma = +5^\circ$ (Fig. 5) the maximum residual stresses decrease from $\sigma_{\text{max}} = 98$ kg/mm² to $\sigma_{\text{max}} = 69$ kg/mm². With further reduction of the cutting angle to $\gamma = -15^\circ$ (Fig. 6) the maximum residual stresses reach values of $\sigma_{\text{max}} = 35$ kg/mm². Thus, for the indicated range

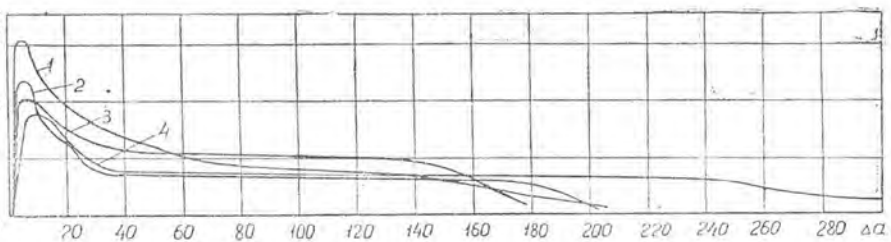


Fig. 6. Influence of the cutting angle on tangential residual stresses.

Geometry of the cut: $v = 42,8$ m/min; $S = 0,3$ mm/rev; $l = 2$ mm.

1 - $\gamma = 0^\circ$; 2 - $\gamma = -5^\circ$; 3 - $\gamma = -10^\circ$; 4 - $\gamma = -15^\circ$.

на передних углах наблюдается уменьшение напряжений в 2,8 раза.

Что касается глубины распространения растягивающих остаточных напряжений, то она увеличивается со $100 \div 150 \text{ мк}$ для $\gamma = +20^\circ \div +5^\circ$ до $200 \div 300 \text{ мк}$ для $\gamma = 0^\circ \div -15^\circ$.

Необходимо отметить некоторые особенности в распределении остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Максимальные значения остаточных напряжений для всех передних углов залегают на глубине, не превышающей 10 мк , причем, с уменьшением переднего угла наблюдается тенденция к удалению максимума напряжений от обработанной поверхности и увеличению глубины его залегания. Начиная с глубины 10 мк , резко снижается уровень остаточных напряжений до глубин, зависящих также от величины передних углов. Для передних углов $\gamma = +20^\circ \div 5^\circ$ резкое снижение напряжения наблюдается до глубины порядка 20 мк , для $\gamma = 0^\circ \div -15^\circ$ — до глубины $30 \div 40 \text{ мк}$. Затем следует зона с относительной стабилизацией уровня остаточных напряжений, которая простирается на значительную глубину. Для этой зоны характерен невысокий уровень остаточных напряжений, примерно одинаков ($\sigma_r = 15-20 \text{ кг/мм}^2$) для всех значений передних углов.

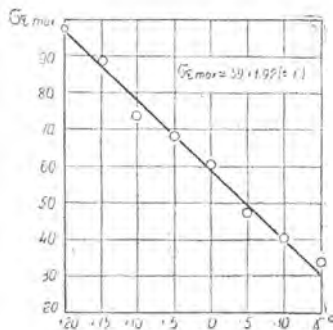
Исследования показывают, что при точении жаропрочной стали ЭИ654Ш в тонком поверхностном слое ($1 \div 2 \text{ мк}$) возникают сжимающие остаточные напряжения, которые, ввиду очень небольшой глубины залегания, не оказывают существенного влияния на качество поверхностного слоя.

Зависимость уровня максимальных остаточных напряжений от величин передних углов показана на фиг. 7. Как видно из графика, эта зависимость для жаропрочной стали ЭИ654Ш имеет линейный характер и может быть выражена приближенной формулой:

$$\sigma_{r \max} = 59 + 1,92 (\pm |\gamma|).$$

На основании проведенных исследований можно сделать

вывод о том, что изменение уровня остаточных напряжений в



Фиг. 7. Зависимость максимальных остаточных напряжений от переднего угла.

Режим резания; $v = 42,8 \text{ м/мин}$;
 $S = 0,3 \text{ мм/об}$; $t = 2 \text{ мм}$.

поверхностном слое жаропрочной стали ЭИ654Ш в зависимости от переднего угла мало зависит от температурного фактора. Действительно, как было показано выше, при уменьшении переднего угла от $\gamma = +20^\circ$ до $\gamma = -15^\circ$ уровень растягивающих остаточных напряжений уменьшается в 2,8 раза. В то же время в указанном диапазоне передних углов температура резания увеличивается всего на 300° , что соответствует зависимости $\Theta = \frac{C}{\gamma^{0,69}}$.

Что касается силовой нагрузки, то в указанном диапазоне передних углов она резко меняется. Таким образом, опытные данные говорят о том, что на величину остаточных напряжений, возникающих при различных передних углах, основное влияние оказывает силовой фактор.

Для уменьшения глубины распространения остаточных напряжений при резании с отрицательными передними углами целесообразно использовать резцы с двойной передней поверхностью (с положительным передним углом и отрицательным углом на фаске шириной $0,2 \div 0,3$ мм), которые дают возможность получить уровень максимальных остаточных напряжений, характерный для отрицательных передних углов, а глубину их проникновения — для положительных углов.

На фиг. 8 приведены эпюры тангенциальных остаточных напряжений, полученные резцами с двойной передней по-



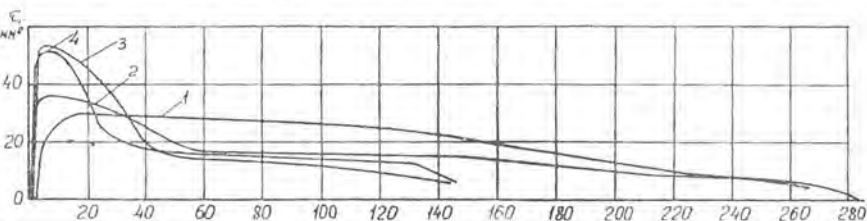
верхностью. Для сравнения на фиг. 8 даны эпюры для резцов без фаски. Сопоставление эпюр показывает, что резцы с двойной передней поверхностью ($\gamma = -5^\circ/+10^\circ$; $\gamma = -10^\circ/+15^\circ$)

и резцы с отрицательными передними углами по всей передней поверхности ($\gamma = -5^\circ$ и $\gamma = -10^\circ$) дают близкие по значениям максимальные остаточные напряжения. Глубины залегания остаточных напряжений, полученные при работе резцами с двойной передней поверхностью, соответствуют тем, которые имеют место для резцов с соответствующими положительными передними углами.

Необходимо отметить, что применение резцов с большими отрицательными передними углами на фаске ($\gamma = -20^\circ$) приводит к значительному ухудшению процесса стружкообразования и появлению вибраций. Учитывая это обстоятельство, передние углы $\gamma = -5^\circ/+10^\circ$ двойной передней поверхности необходимо считать оптимальными, как обеспечивающие благоприятное влияние на формирование остаточных напряжений и хорошие условия резания, тем более, что указанные передние углы являются наивыгоднейшими с точки зрения стойкостных свойств резцов.

Таким образом, правильный выбор оптимальной геометрии инструмента не может быть сделан без учета возникающих в результате механической обработки остаточных напряжений в поверхностном слое и является одним из надежных методов их регулирования и управления.

На фиг. 9 даны эпюры тангенциальных остаточных напряжений, полученные при различных скоростях резания резцами с передними углами $\gamma = -5^\circ/+10^\circ$. Как видно из фиг. 9,



Фиг. 9. Влияние скорости резания на тангенциальные остаточные напряжения.

Геометрия резца: $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\gamma_f = -5^\circ$; $f = 0,3$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\lambda = 10^\circ$; $r = 0,8$. Сечение среза: $I = S \times l = 0,3 \times 2$ $l = v = 5,4$ м/мин; $2 \rightarrow v = 21,4$ м/мин; $3 \rightarrow v = 42,8$ м/мин; $4 \rightarrow v = 68,4$ м/мин.

с увеличением скорости резания увеличиваются максимальные значения остаточных напряжений и уменьшается глубина их залегания. В исследуемом диапазоне скоростей $V = 5,4 \div 68,4$ м/мин максимальные значения остаточных напряжений

меняются от $\sigma_{\tau_{\max}} = 29 \text{ кг/мм}^2$ до $\sigma_{\tau_{\max}} = 50 \div 53 \text{ кг/см}^2$, т. е. в 1,8 раза.

Такое возрастание остаточных напряжений с увеличением скорости резания нельзя объяснить воздействием силового поля, ибо динамические исследования показывают, что в указанном диапазоне скоростей главная составляющая усилия резания меняется в незначительных пределах. По-видимому, в данном случае главную роль в формировании остаточных напряжений играет температура резания, которая в диапазоне скоростей $v = 5 \div 78 \text{ м/мин}$ меняется от $\Theta = 325^\circ$ до $\Theta = 1050^\circ$. Такое резкое возрастание температуры с увеличением скорости, с одной стороны, приводит к разогреву металла и увеличению его пластичности, что способствует формированию растягивающих остаточных напряжений, с другой стороны, значительно уменьшая угол трения (коэффициент трения) создает условия для возрастания интенсивности растягивающего силового поля.

На фиг. 9 наглядно представлено резкое увеличение глубины залегания растягивающих остаточных напряжений при уменьшении скорости резания. Так, если для скоростей $v = 42,8 \div 68,4 \text{ м/мин}$ глубина залегания $\Delta a = 140 - 150 \text{ мк}$, то для скоростей $v = 5,4 \div 21,4 \text{ м/мин}$ она составляет 270—280 мк. На величину и глубину залегания остаточных напряжений при малых скоростях резания оказывает, очевидно, влияние, кроме указанных причин, наростообразование, которое изменяет условия контакта стружки с передней поверхностью и уменьшает величину переднего угла. Наблюдаемое некоторое уменьшение максимального значения остаточных напряжений при переходе от скорости $v = 42,8 \text{ м/мин}$ к скорости $v = 68,4 \text{ м/мин}$ объясняется усиленным износом реза на больших скоростях резания, что приводит к быстрому затуплению режущей кромки и уменьшению действительного переднего угла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Резников и др. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов. Машгиз, 1960.
2. Н. И. Резников. Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Труды всесоюзной межвузовской конференции, Куйбышев, 1962.
3. Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов. Механическая обработка жаропрочных стали ЭИ654 и сплава ЭИ437. Производственно-технический бюллетень. Москва — Дом техники, № 12, 1959.

4. А. Н. Резников. Теоретические основы активного охлаждения инструментов. Труды всесоюзной межвузовской конференции, Куйбышев, 1962.

5. Б. А. Кравченко. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. Куйбышевское книжное издательство, 1962.

6. Н. И. Резников. Учение о резании металлов. Машигиз, 1947.
