

Инженер ЛАММ М. М.

ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Печатаемая ниже статья является продолжением главы 2-й диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук „Основы гидродинамической теории резания металлов“ (см. Научные записки ХАИ, ч. II, вып. IV).

Вся работа, объемом в 14—15 печ. листов имеет 6 глав.

В первой главе даются общие теоретические предпосылки и выдвигается гипотеза о том, что металл в процессе своего стружкообразования ведет себя по отношению к телу реза подобно жидкости. На этом основании дается объяснение всем явлениям в резании металлов (явление „обратной стружки“, наростообразование и т. д.).

В главе III, помощью основных законов гидромеханики, дается обоснование стахановских режимов резания.

В главе IV разработана новая методика экспериментирования и отыскания уравнения давления резания.

В главе V приведены экспериментальные работы по лаборатории резания, металлические испытания (указывающие последствия течения металла в процессе его резания) и механические испытания образцов из стружки.

Глава VI содержит стойкостные испытания и испытания удобообтекаемых резцов в цеховых условиях.

Опыты показали, что стойкость удобообтекаемых резцов была в 3—5 раз выше, чем для резцов обычных и что режимы резания можно было в 2,5 раза увеличить против фактически установленных на заводе.

В первой части теоритической главы (том II, выпуск IV) были допущены некоторые неточности и легко устранимые погрешности, сводящиеся к следующему:

1. Вывод основного уравнения давления резания $P = \rho F v^2 (R_e)^{a(\lambda)^b}$ (принятый нами по Бриджмену), хотя и правилен, но не в достаточной степени строгий. Однако, уравнение вида $P = \rho F v^2 f(R_{e1}, \lambda)$ может быть получено строго. На основании же данных практики, мы можем сказать, что неизвестная функция $f(R_{e1}, \lambda)$, может быть выражена как степенная зависимость. Получающаяся при этом степень точности не только удовлетворяет всем необходимым техническим расчетам, но не выходит за пределы относительных ошибок, даваемых нашей измерительной аппаратурой.

2. Несмотря на то, что размерность ρv^2 равна размерности удельного давления резания P , производить замену одной величины другою нельзя. В таком случае, приведение основного уравнения давления резания к практическому виду будет следующее:

$$\text{Мы знаем, что } \mu = f(v); \rho = f_1(v)$$

Следовательно, для того, чтобы выявить раздельное влияние скорости резания v и изменение геометрических размеров стружки на давление резания, нужно было бы провести две серии опытов

$$I. \text{ При } F = \text{const}; \lambda = \text{const}$$

$$P = \text{const } \rho v^2 \left(\frac{\mu}{\rho v} \right)^a \cong \text{const}$$
 (так как практически давление резания от скорости не зависит)

II. При $v = \text{const}$

$$P = \rho \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a \left(\frac{1}{\sqrt{hs}}\right)^a hs \left(\frac{h}{s}\right)^b = \text{const } h^{1+(a-\frac{b}{2})} s^{1-(a+\frac{b}{2})} \cdot \rho \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a = |\text{const } h^x s^y| \rho \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a$$

3. При выводе 2-го варианта уравнения давления резания сказано, что показатель числа Рейнольдса всегда меньше минус второй степени; следует считать, что абсолютное значение этого показателя степени меньше двух.

Факторы, влияющие на процесс наростообразования и период резания инструмента

Нами выяснено вредное воздействие нароста на процесс стружкообразования как в смысле увеличения сопротивления резанию, так и в смысле уменьшения стойкости инструмента и ухудшения чистоты обрабатываемой поверхности. Если для обдирочного режима чистота обрабатываемой поверхности не имеет никакого значения, то для отделочной стружки это требование является одним из существеннейших, т. к. та или иная чистота обрабатываемой поверхности будет определять величину припуска на дальнейшие доводочные операции (развертывание, шлифовка). Следовательно, мы заинтересованы в отыскании факторов, влияющих на процесс наростообразования.

В настоящее время твердо принят следующий порядок установления режимов резания: берется максимально возможная по технологическим соображениям глубина резания (стремятся к тому, чтобы весь припуск на черновую обработку снять в один проход), максимально допустимая станком подача и при принятом периоде резания T — необходимая для этого скорость резания v . Поэтому, такие факторы, как скорость резания, глубину и подачу мы из своего рассмотрения опускаем. В конце концов нас интересует не только простая констатация увеличения или уменьшения нароста (в зависимости от изменения скорости резания или сечения снимаемой стружки), но и возможность уменьшения этого нароста для определенно взятого режима резания. В таком случае в нашем распоряжении остаются такие меры воздействия, как полировка режущей поверхности, охлаждение — смазка и параметры, определяющие „геометрию“ резца (угол в плане, передний угол и т. д.).

Полировка режущей поверхности

Полировка режущей поверхности непосредственно не оказывает почти никакого влияния на самый процесс наростообразования. В самом деле, вне зависимости от состояния режущей поверхности, для данного режима резания и геометрии резца, вид пластического потока металла будет один и тот же, а следовательно, и соответственное ему — одно и то же растекание струй, обуславливающее, в свою очередь, интенсивность наростообразования. Однако, важно не только образование нароста, но и возможность накопления его. Конечно, при более гладкой поверхности обтекания частицы нароста не так прилипают к этой поверхности, легче смываются потоком металла, отходящим в стружку. Чем лучше отполирована режущая поверхность резца, тем меньший мы имеем коэффициент трения, тем меньшая работа трения и механический износ резца.

Увеличение периода резания полированных резцов будет происходить еще по одной причине. Дело в том, что при более гладкой поверхности обтекания получается меньшее затормаживание слоев

металла, соприкасающихся с режущей поверхностью, а вследствие этого и меньший перепад скорости по высоте потока.

Так как внутреннее трение вязкой жидкости в первую очередь зависит от относительной скорости перемещения одного рассматриваемого слоя по другому, то очевидно в нашем случае получится и меньшая работа внутреннего трения. Значительная часть работы внутреннего трения идет на теплообразование. Нам известно, что износ режущей поверхности происходит не только вследствие механического истирания отходящей стружки, но и в значительной степени вследствие деформации режущей поверхности скоростным напором набегающего пластического потока. Отсюда ясно, что при одной и той же скорости резания и прочих равных условиях обработки полировка режущей поверхности является причиной меньшего теплообразования при процессе резания, меньшего теплового износа.

Итак, полировка режущей поверхности с одной стороны — препятствует накоплению нароста, тем самым уменьшая механический износ, с другой же стороны уменьшает и тепловой износ. В зависимости от обрабатываемого материала и взятых режимов резания тот или иной вид износа будет иметь преобладающее значение.

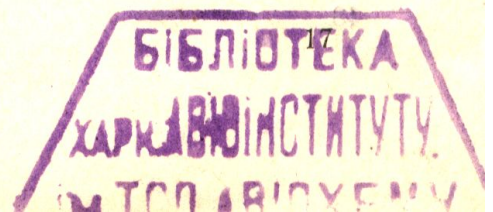
Увеличение механического износа режущей поверхности при интенсивном накоплении нароста происходит не только потому, что при этом увеличивается давление резания (вследствие увеличения коэффициента лобового сопротивления), но также по следующим соображениям. В то время, как при любых употребляющихся на практике режимах резания слои металла, соприкасающиеся с режущей поверхностью инструмента, находятся безусловно в состоянии текучести, и, следовательно, трение стружки о рабочую часть режущей поверхности мы ни в коем случае не можем считать трением „сухим“, — частицы нароста представляют собой целиком частицы твердого тела. Твердость их значительно превышает твердость исходного обрабатываемого материала и поэтому, прижимаясь к режущей грани скоростным напором, частицы нароста царапают эту поверхность и приводят ее к более быстрому механическому износу.

Между прочим одной из причин увеличения периода резания резца при одновременном увеличении удельного давления резания для работы с большими удлинениями стружки λ для данного поперечного сечения стружки и является наростообразование, вернее разная способность к накоплению нароста при разных удлинениях λ . Чем большая длина режущего лезвия резца при заданном сечении стружки, тем чаще срывание нароста в единицу времени (срыв нароста происходит не по всему лезвию одновременно), тем меньшие абсолютные размеры смытых потоком частиц.

На основании сказанного выше, ясно, что при увеличении удлинения стружки λ , увеличивается период резания резца T .

Выше мы утверждали, что состояние режущей поверхности само по себе не оказывает никакого влияния на процесс наростообразования, ибо для данного обрабатываемого материала и режима резания растекание струй будет зависеть только от геометрической формы этой режущей поверхности. Строго говоря, это утверждение не верно, и вот почему: характер растекания отдельных элементарных струек потока зависит от вязкости жидкости μ и от плотности ее ρ . Так как оба эти фактора являются величинами переменными — в зависимости от изменения секундного количества тепла, выделяющегося при резании, то состояние режущей поверхности должно оказывать косвенное влияние и на сам процесс наростообразования.

На рис. 1 приведен характер растекания струй двух жидкостей, отличающихся своей вязкостью: для жидкости с большей вязкостью



растекание струй будет большим. Влияние плотности будет прямо противоположное: чем больше плотность жидкости, тем меньше будет растекание струй.

На основании сказанного мы можем встретить и объяснить такое парадоксальное явление: при обработке вязких машино-подделочных сталей для одних и тех же режимов резания могут получаться большие удельные давления резания, чем для легированных специальных (хромистых), несмотря на то, что временное сопротивление на разрыв и твердость по Бринеллю для этих последних сталей выше, чем для первых.

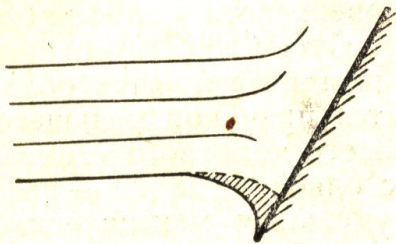


Рис. 1

Для специальных легированных сталей напряжение деформации пластичности значительно большее, чем для сортовых машино-подделочных [обычно $N_{пл}$ для первых сталей лежит в пределах 0,7—0,8 от временного сопротивления на разрыв, для последних же $N_{пл} = (0,4—0,5) R$], поэтому и усилие, необходимое для получения пластического потока, и скоростной напор,

будет выше для специальных легированных сталей.

Однако, резец воспринимает на себя не весь скоростной напор, а только часть его, обуславливаемую величиной коэффициента лобового сопротивления c_x . Обильное наростообразование, какое мы должны ожидать для вязких сталей, сильно увеличивает коэффициент лобового сопротивления, ибо в этом случае обтекание будет происходить не по заданной режущей поверхности, а по какой-то иной, ухудшенной. В результате этого полное давление резания (статическое давление плюс скоростной напор) и может получиться большим для обычных машино-подделочных сталей, чем для сталей легированных.

Охлаждение — смазка

Когда мы говорим „работа с охлаждением“ или „без охлаждения“, то нужно иметь в виду две роли, которые выполняет охлаждающая жидкость, это: охлаждение режущей поверхности и металла, отходящего в стружку, и смазка режущей поверхности. Охлаждение режущей поверхности безусловно увеличивает стойкость инструмента или при заданном периоде резания повышает критическую скорость резания.

Смазывающее действие охлаждающей жидкости аналогично полировке режущей поверхности. Таким образом все, что сказано нами о влиянии полировки режущей поверхности на период резания, остается в силе и для данного случая.

Наиболее ценной по своим охлаждающим свойствам будет жидкость с большой теплоемкостью, каковой является вода. При чистой обточке, характеризуемой большой скоростью резания, наиболее ценным свойством воды будет именно ее охлаждающее свойство, позволяющее при принятом периоде резания повысить критическую скорость резания. Сама же скорость резания является причиной полного устранения или значительного уменьшения нароста.

Однако, смазочные свойства воды оставляют желать много лучшего. Поэтому там, где нужно получить достаточную чистоту обрабатываемой поверхности при невозможности работать с большими скоростями резания (например, нарезка резьбы, чистовая нарезка зубчатых колес и т. д.), — нужно применить более совершенную смазку (масло). Как видим, в этом случае главную роль в устранении нароста, а следовательно, и в получении потребной чистоты обработки, играет смазочное свойство охлаждающей жидкости.

Перейдем теперь к вопросу о влиянии „геометрии“ резца на наростообразование и период резания инструмента.

Влияние угла в плане

Нетрудно убедиться, что главный угол в плане оказывает влияние на период резания в таком же направлении, как и удлинение стружки λ . При постоянном угле в плане φ , удлинением стружки мы называем отношение глубины резания к подаче. Если же этот угол φ не является величиной постоянной, то удлинением стружки более правильно следует считать отношение ширины стружки a к ее толщине b . Если это последнее отношение обозначить через λ_1 , то очевидно,

$$\lambda_1 = \frac{a}{b} = \frac{h}{S} \cdot \frac{1}{\sin^2 \varphi} \text{ или } \lambda_1 = \frac{\lambda}{\sin^2 \varphi}$$

Иными словами, изменение угла в плане φ при постоянном отношении глубины резания h к подаче S как бы изменяет удлинение λ , а следовательно, и влияет на величину удельного давления резания p и период резания T . Однако, удельное давление резания и стойкость могут меняться не в строгом соответствии с изменением λ_1 (λ_1 обратно пропорционально квадрату синуса угла в плане), и причина этого заключается в различной возможности накопления нароста. Для данного сечения снимаемой стружки нарост уменьшится при увеличении длины режущего лезвия. Принимая во внимание, что при увеличении наростообразования и удлинения λ , коэффициент лобового сопротивления c_x также увеличивается, может иногда получиться (особенно для вязкой стали), что удельное давление p для резцов с углом в плане $\varphi < 90^\circ$ будет меньше, чем для резцов с $\varphi = 90^\circ$.

Вообще же влияние угла в плане на удельное давление резания сравнительно невелико (для обычно употребительных на практике углов в плане изменения удельного давления резания не превышает 8%).

На период резания T угол в плане оказывает несколько большее влияние. Для оценки влияния угла в плане φ на удельное давление резания и на стойкость приведем следующий пример. Допустим, мы работаем с сечением стружки $F = \text{const}$ и $\lambda = \text{const}$, но с переменным углом в плане φ ; пусть нам по опытным формулам $p = \text{const} (\lambda)^{1/8}$ и $T = \text{const} (\lambda)^{1/6}$ известны значения $p = A$ и $T = B$ для угла в плане $\varphi = 90^\circ$. Тогда для угла в плане $\varphi = 45^\circ$ (и без учета влияния нароста) наши зависимости переписутся:

$$p_1 = \text{const} \left(\frac{\lambda}{\sin^2 45^\circ} \right)^{1/8} = \frac{A}{4\sqrt{\sin 45^\circ}} = \frac{A}{0,965} \cong 1,035 A \text{ (разница 3,5\%)}$$

$$T_1 = \frac{B}{3\sqrt{\sin 45^\circ}} = \frac{B}{0,954} \cong 1,05 B \text{ (разница 5\%).}$$

Как видим, разница в удельном давлении резания и в стойкости близка к относительным ошибкам наших измерений и только наростообразование делает эту разницу более заметной.

Влияние поперечного сечения резца на стойкость

Еще Тейлором было замечено, что при прочих равных условиях работы резец с большим поперечным сечением работает дольше. Обработка его опытных материалов дает эту зависимость (для углеродистых сталей и быстрорежущих резцов) в виде:

$T = \text{const } q^{0,134}$, где q — поперечное сечение резца. Многие исследователи после него это положение также подтвердили. Так, по Демстер-Смитту значение показателя степени при поперечном сечении резца (для углеродистой стали и быстрорежущего резца) равно $x = 0,08$; по Валликсу и Крекелеру для легированной никелевой и хромоникелевой сталей и быстрорежущего резца $x = 0,135$ (см. выше табл. 2).*

Объяснить, почему должна существовать подобная зависимость не трудно, если вспомнить, что все количество тепла, получаемое резцом в процессе резания, снимается охлаждающей жидкостью и лучеиспусканием и, наконец, отводится внутрь резца. Способность резца отвести тепло вглубь себя зависит, конечно, не только от теплопроводности и теплоемкости материала резца, но в известной степени и от самой массы резца. Очевидно, чем больше масса резца, тем лучше и больше отвод тепла.

Следовательно, увеличение поперечного сечения резца преследует ту же цель, что и охлаждение. Значит, при определенно принятом периоде резания T резцом с большим поперечным сечением можно работать с большей скоростью.

Однако, точно так же, как и интенсивность охлаждения повышает критическую скорость резания лишь до известного для данного режима резания предела, так и увеличение поперечного сечения резца доходит до своего предела, дальше которого увеличения периода резания практически наблюдаться не будет. Поэтому, когда идет речь о численных значениях показателя степени при поперечном сечении резца q , приведенных в табл. 2 стойкостных зависимостей, то нужно всегда ограничивать себя пределами, в которых эти зависимости будут верны. Строго говоря, показатель степени q должен быть переменным, уменьшаясь до 0 при увеличении поперечного сечения резца.

В настоящее время из-за экономии быстрорежущей стали и широкого внедрения в промышленность твердых сплавов работа ведется исключительно напайными пластинками; поэтому нужно несколько остановиться на подобных резцах.

Во-первых, мы теперь можем утверждать, что пластинку необходимо напавать таких размеров, чтобы площадь контакта ее с державкой резца была бы достаточна. Из этих же соображений лучше делать врезную пластинку, а не напавать ее сверху. Хорошим материалом для пайки будет материал с большой теплопроводностью (медь). При плохой пайке в месте соприкосновения пластинки с державкой резца будет много шлаковых включений и окислов, которые являются плохими проводниками тепла. Отсюда ясна роль хорошей припайки пластины. Если в результате плохой припайки пластина и не отлетит от действия на нее составляющих давления резания, то она все же потеряет в своей стойкости в силу ухудшенной отдачи тепла державке резца.

Само собой разумеется, желательно, чтобы материал державки резца обладал бы достаточной теплопроводностью и теплоемкостью. Ввиду небольшой теплопроводности напайных пластинок (например, твердых сплавов), толщина их должна была бы быть возможно меньше. Ограничение этому — требуемый минимум переточек резца. Наиболее выгодно напавать пластину под углом, равным переднему углу резца. Это приводит к экономному расходу режущего материала и одновременно удовлетворяет требованию максимального количества переточек резца при заданном переднем угле.

* См. том II, выпуск IV.

Вибрация резца

Иногда можно наблюдать при определенно взятом режиме резания сильную вибрацию резца. На обрабатываемом предмете появляется характерная рябь. Такую же рябь или мелкие волны можно увидеть на обрабатываемом буртике и на поверхности стружки, соприкасавшейся с передней гранью резца. Как говорят „станок дробит“. Чаще всего единственный способ ликвидировать вибрацию — это изменение режимов резания: уменьшение глубины резания, увеличение подачи или изменение скорости резания. Следует подчеркнуть изменение скорости резания, потому что иной раз ее нужно уменьшить (для чистовых режимов), иной же раз, наоборот, увеличить для того, чтобы получить спокойную работу резца. Разберем это интересное явление и постараемся выяснить, под влиянием каких причин может появиться вибрация резца.

Под действием вертикальной составляющей давления резания резец отклонится на некоторую величину Δx назад и будет оказывать противодействие, равное внешней силе. Каждому значению внешней силы соответствует свое отклонение режущей поверхности для данного сечения резца и его вылета. Очевидно, наша система остается в равновесии при условии постоянства внешней силы.

Если по каким-либо причинам внешняя сила внезапно уменьшится, то под действием упругих сил резец получит поступательное движение вверх, причем под действием этих же упругих сил он перейдет свое нейтральное положение. Однако, резец займет снова свое положение, соответствующее измененной внешней силе, хотя и не сразу, а после некоторых затухающих колебаний. Непрерывные же колебания резца мы можем назвать *автоколебаниями*.

Под влиянием же каких причин внешняя нагрузка может непрерывно меняться?

Как известно, скорость оказывает очень малое влияние на изменение давления резания (во всяком случае в области практических режимов резания). Поэтому можно было бы предположить, что то ничтожное изменение скорости резания, которое может иметь место вследствие чисто случайных причин (колебание в числах оборотов шпинделя), безусловно не оказывает никакого влияния на изменение давления резания. Однако, тут важно не само изменение скорости, но изменение числа Рейнольдса, которое, как известно, определяет вид потока. При одной и той же скорости, но разных значениях остальных факторов, число Рейнольдса будет меняться по своей величине. Известно также, что при некоторых значениях числа Рейнольдса (критических) коэффициент лобового сопротивления резко падает. Вблизи же этого критического числа Рейнольдса в сторону его увеличения и уменьшения будет область неустойчивого режима. Самые незначущие факторы и случайные причины могут сдвигать наш режим вправо или влево от критического и, следовательно, эта область неустойчивого режима может характеризоваться двойственностью коэффициентов лобового сопротивления c_x .

Значит, если мы работаем в области неустойчивого режима, то даже небольшие колебания в скорости резания могут изменить давление резания. Однако, нетрудно убедиться, что при работе в неустойчивом режиме скорость резания изменяется весьма значительно.

В самом деле, пусть коэффициент лобового сопротивления внезапно уменьшится. Вследствие этого уменьшится внешняя нагрузка на резец, и его режущая поверхность, под действием сил упругости, получит поступательное движение вверх. В нейтральном положении действие упругих сил прекратится, но по инерции резец пойдет еще

далее вверх. Начиная от крайнего нижнего и до среднего положения резца мы будем иметь непрерывное уменьшение коэффициента лобового сопротивления и, следовательно, давления резания (ввиду того, что действительная скорость потока все время возрастает. (Скорость потока будет складываться из окружной скорости обрабатываемого предмета и скорости резца).

Таким образом, при среднем положении резца наш режим максимально сдвинулся вправо от критического числа Рейнольдса.

Начиная от среднего до крайнего верхнего положения резца происходит уменьшение скорости резца, а следовательно, действительная скорость резания уменьшается, коэффициент лобового сопротивления начинает увеличиваться, давление резания увеличивается. Наш режим начинает сдвигаться влево, но все же находится за критическим числом Рейнольдса.

Далее процесс протекает в обратном порядке. Под влиянием нарастающего давления резания и упругих сил режущая поверхность получает резкое поступательное движение вниз. Коэффициент лобового сопротивления быстро нарастает (вследствие резкого падения действительной скорости резания). Разность между окружной скоростью обрабатываемого предмета и скоростью резца может быть не только равной нулю, но даже величиной отрицательной. В этом случае получается отставание стружки от режущей поверхности инструмента. Вследствие этого где-то внизу за нейтральным положением резца должен получиться удар, а на буртике обработки — волна. На этом этапе наш режим резко смещается влево от критического. Естественно, что там, где действительная скорость резания невелика (приближающаяся к нулю), мы вправе ожидать даже стружку скалывания. Более того, при скорости потока, близкой к нулю, внутреннее трение вязкой жидкости также стремится к нулю, *т. е. мы выходим из области гидродинамической сущности процесса резания, а попадаем в область физики твердого тела.* После того, как резец дошел до своего крайнего нижнего положения, процесс повторяется снова.

Как видим, поведение самого резца способствует изменению давления резания; в свою очередь, изменение давления резания поддерживает колебания резца. Взаимодействие этих двух факторов как бы направлено в сторону сохранения колебательного состояния системы. Поэтому термин „автоколебания“ нужно признать весьма удачным, вполне выражающим истинное положение вещей.

Более точно мы можем выразиться следующим образом: автоколебание есть результат взаимодействия упругих напряжений резца (и станка) и изменения усилий резания.

Выше мы рассмотрели вопрос вибрации резца или автоколебаний в общем виде. Остается разрешить ряд частных случаев, при которых мы можем попасть в область неустойчивых режимов работы, характеризующихся главным образом двойственностью коэффициентов лобового сопротивления.

На первый взгляд может показаться, что критическое число Рейнольдса может получиться только при больших скоростях резания. Бесспорно, скорость резания является одним из основных факторов, определяющих величину числа Рейнольдса, — но не единственным. То или иное значение числа Рейнольдса определяется еще: сечением снимаемой стружки F , удлинением стружки λ и величинами плотности ρ и вязкости μ обрабатываемого материала, а кроме того степенью изменения ρ и μ от F и λ . Иными словами, число Рейнольдса зависит не только от каких-то начальных значений плотности и вязкости материала (допустим, до момента резания), а и от того, на-

сколько они меняются в зависимости от изменения скорости резания и поперечного сечения снимаемой стружки.

Пусть, работая с определенной постоянной скоростью резания, мы имеем непрерывную стружку (иначе говоря, сливную стружку). Тогда, постепенно увеличивая поперечное сечение снимаемой стружки, мы можем получить стружку скалывания с большими или меньшими скалывающимися элементами. Для того, чтобы при этих новых режимах резания получить сливную стружку, мы снова должны увеличить скорость резания. Для вязких обрабатываемых материалов появление в стружке отдельных скалывающихся элементов означает, что мы частично имеем дело уже с физикой твердого тела.

Область неустойчивого режима работы и является границей перехода от сливной стружки к стружке скалывания и наоборот.

Таким образом, и при небольшой скорости резания, но при соответственно большом поперечном сечении снимаемой стружки, мы можем достигнуть критического числа Рейнольдса. При данной скорости резания и данном поперечном сечении снимаемой стружки область неустойчивого режима может определяться значением удлинения стружки. Это подтверждается тем, что вибрацию резца (или „дробь“ станка) можно ликвидировать, только меняя отношение глубины резания к подаче, не меняя при этом сечения стружки.

Пусть, наконец, мы работаем с постоянными: скоростью резания v , сечением стружки F и удлинением λ , но при этом воздействуем на геометрию резца, увеличивая передний угол от нуля и до тех пор, насколько это будет возможным. Постепенно увеличивая передний угол, мы получим вместо сливной стружки стружку скалывания или даже стружку надлома. Интересно, что если при некоторых значениях скорости резания и поперечного сечения стружки для переднего угла, равного нулю, получается стружка скалывания, то увеличение переднего угла приводит сначала к сливной стружке, а затем снова к стружке скалывания. Таким образом, каждому взятому режиму резания соответствует своя критическая величина переднего угла резца, при котором может иметь место неустойчивый режим. Само собою разумеется, что величина критического угла зависит от рода обрабатываемого материала.

Попутно можно указать на один из практических приемов полного или частичного устранения вибрации резца, основанном на изменении переднего угла. Предположим, что при вполне определенном режиме работы получается вибрация резца, и что мы не имеем возможности менять ни глубины резания, ни подачи, ибо они диктовались соображениями технологического порядка (глубина — припуском, оставленным на чистовую обточку; подача — величиной остаточных гребешков). В нашем распоряжении остается как будто только снижение скорости резания. Однако, это мероприятие связано с увеличением времени обработки детали. Некоторые из токарей слегка тупят режущую кромку резца для того, чтобы стружка больше „осаживалась“. Такое затупление режущей кромки может не только уменьшить данный угол наклона некоторой части режущей грани, но даже сделать этот угол отрицательным.

Между прочим, изменение переднего угла наиболее наглядным образом иллюстрирует изменение вида потока. При больших значениях переднего угла получается картина, указанная на рис. 2, а именно: область пластических деформаций (заштрихована) не охватывает всей толщины металла, отходящего в стружку. Образно выражаясь, создается впечатление, будто наш поток вязкой жидкости покрыт кромкой льда, которая при встрече с режущей поверхностью инструмента (а вернее даже чуть пораньше) разламывается на отдель-

ные куски. В зависимости от толщины этой „кромки льда“ мы будем считать, что в основном *будут приложимы либо законы гидродинамики, либо законы физики твердого тела, либо взаимодействие тех и других.*

Опыты гидродинамиков Феппля и Флагбарта с продувками плоских пластин в аэродинамической трубе показывают, что существуют определенные критические углы наклона этих пластин к потоку воздуха, при которых получаются неустойчивые режимы, характеризуемые двойственностью коэффициентов лобового сопротивления.

Так, по Фепплю, если установить плоскую пластину под углом в 38° к потоку воздуха, то получается, что на аэродинамических весах фиксируются все время большие сопротивления, когда пластину в процессе продувки осторожно поворачивать до 39° до 41° и даже до 42° . При этой последней величине угла случайные и неуловимые причины сразу и притом резко нарушают закон изменения коэффициента лобового сопротивления в сторону его резкого падения.

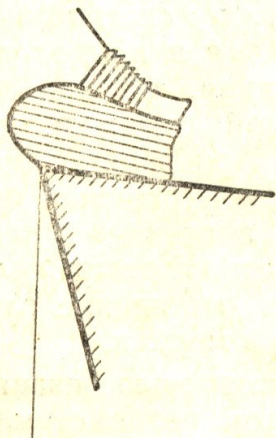


Рис. 2

Та же плоская пластина, установленная под углом в 40° к потоку, давала то большие, то меньшие значения коэффициента лобового сопротивления, причем то, что устанавливалось сразу после запуска вентилятора аэродинамической трубы, обладало большой устойчивостью.

Из опытов Феппля следует также, что величина критического угла зависит от удлинения пластины λ .

Возвращаясь к вопросу автоколебаний, мы можем сказать, что амплитуда колебаний резца зависит от жесткости резца и его вылета. В свою очередь жесткость H определяется геометрическими размерами и модулем упругости:

$$H = \frac{\text{const}}{EI}.$$

Отсюда мы можем сделать следующее заключение:

1) вибрацию резца можно устранить полностью или частично, увеличив поперечное сечение резца (выгоднее, конечно, увеличивать его высоту) или уменьшив вылет его.

2) в случае работы с напайными резцами для державки нет никакого смысла применять специальные стали ввиду относительно небольшой разницы в величине модуля упругости для простых и специальных сортов сталей ($E = 2\,000\,000 - 2\,200\,000$). Иногда и увеличение размеров резца, и уменьшение его вылета не приводят к желаемым результатам, вследствие малой жесткости самого станка. В этих случаях приходится изменять только режимы резания.

На процесс наростообразования вибрация резца, очевидно, влияет в сторону его уменьшения, — в особенности при большой частоте колебаний. Однако, при этом ударная нагрузка выводит резец из строя быстрее. Вследствие этого для сохранения принятого периода резания приходится уменьшать скорость резания. По данным Тейлора такое уменьшение скорости резания нужно принять равным примерно 15%.

Вспомогательный угол в плане и радиус закругления носика резца

Вспомогательный угол в плане φ_1 оказывает влияние на период резания T примерно в том же направлении, как и поперечное сечение резца, как и смазка — охлаждение режущей поверхности.

Уменьшение вспомогательного угла в плане приводит к ухудшению отвода тепла. Следовательно, не следует его делать большим.

В силу тех же соображений носик резца следует давать определенный радиус закругления. Попутно с этим мы уменьшаем величину остаточных гребешков на обрабатываемом изделии. Величина радиуса закругления носика резца зависит от вспомогательного угла в плане: чем угол этот больше, тем больший нужен радиус закругления носика. Радиус закругления носика ведет не только к лучшему отводу тепла от режущей поверхности, но может иметь еще и другое значение.

Дело в том, что в обычных цеховых условиях работы станка всегда имеют какой-то, хотя бы и небольшой, процент износа (например, увеличение люфта в каретке суппорта, биение шпинделя станка и т. д.). Тогда, в случае большого вспомогательного угла в плане и незначительного радиуса закругления носика резца, даже при небольшом биении шпинделя и более или менее повышенной скорости резания, носик резца быстро деформируется и выводит из строя резец.

Несмотря на то, что радиус закругления носика является причиной некоторого увеличения радиальной составляющей давления резания, он способствует более спокойной работе резца. Тейлоровские резцы имеют значительный радиус закругления. Закругление обычных прямолинейных проходных резцов колеблется в пределах $r = 2-3$ мм, мы же для своих опытных резцов брали его не более 1,5—2 мм.

Влияние переднего угла

Для различных обрабатываемых материалов практикой установлены значения переднего угла резца. Как правило, этот угол уменьшается вместе с увеличением временного сопротивления на разрыв обрабатываемого материала и его твердость. Так, для углеродистой машиноподелочной стали „ст-5“ берется передний угол 20° , для хромоникелевой марки „Х4Н“ этот угол равен 15° . В результате стахановских режимов резания передний угол, как впрочем и вся „геометрия“ резца, подверглись значительному изменению. Вопрос рационального выбора переднего угла резца не так прост, как это может показаться на первый взгляд. Это происходит потому, что до сих пор в теории резания металлов как-будто нет прямой видимой связи между давлением резания и стойкостью режущей поверхности инструмента.

В самом деле, нельзя сказать, что чем меньше давление резания для данного обрабатываемого материала, тем больше стойкость резца, равно как и обратное утверждение, а именно, что чем больше значение удельного давления резания, тем больше стойкость, — так же неверно.

Мы уже говорили прежде, что затупление резца складывается из двух видов износа, которые мы назвали механическим и тепловым износом. Совершенно очевидно, что изменение переднего угла резца оказывает разное влияние на каждый из названных видов износа. При увеличении переднего угла резцом воспринимается меньшая часть скоростного напора, иначе говоря уменьшается коэффициент лобового сопротивления, Помимо этого должно уменьшиться наростобразование, так как при этом уменьшается растекание струек пластического потока металла у режущей кромки резца. Вследствие этого давление резания падает и, следовательно, при данной скорости резания и прочих равных условиях работы, механический износ резца должен уменьшиться.

Вследствие уменьшения нароста в известной степени должен также уменьшиться и тепловой износ. Вообще говоря, уменьшение давления резания может происходить по двум причинам: во-первых, если мы улучшим условия обтекания, т. е. уменьшим ту часть скоростного напора, которую резец воспринимает на себя; во-вторых, это произойдет при условии уменьшения всего скоростного напора пластического потока металла.

Скоростной же напор зависит от плотности ρ и вязкости μ обрабатываемого материала. В свою очередь, величина плотности ρ и вязкости μ данного обрабатываемого материала определяется температурой или же секундным количеством тепла при резании H , от величины которого зависит тепловой износ. При постоянном поперечном сечении снимаемой стружки величины μ и ρ зависят только от скорости резания v .

На основании сказанного мы можем сделать следующие заключения:

1. Уменьшение давления резания вследствие уменьшения коэффициента лобового сопротивления C_x всегда ведет к уменьшению как механического, так и теплового износа. Уменьшение же давления резания вследствие уменьшения всего скоростного напора уменьшает механический износ резца, но увеличивает его тепловой износ.

2. Для данного обрабатываемого материала при постоянно принятых глубине резания h , подачи s и геометрии резца — должна существовать своя наивыгоднейшая скорость резания v , при которой резец до своего затупления снимет максимальный объем стружки.

Так как передний угол (см. о влиянии переднего угла на вибрацию резца) изменяет вид потока, то мы можем считать, что при принятом периоде резания T должна существовать следующая зависимость

$$\gamma = f(P, H), \quad (41)$$

т. е. передний угол резца для данного периода резания является функцией удельного давления резания и секундного количества тепла. Нам известно, что в свою очередь

$$P = f(\rho, \mu, v, h, s) \text{ и } H = f(v, \rho, c, r, h, s);$$

поэтому нашу зависимость (41) можно переписать в развернутом виде так:

$$\gamma = f(v, \mu, \rho, c, r, h, s) \quad (42)$$

Представим эту функцию в виде

$$\gamma = \text{const } v^a \mu^b \rho^c c^d r^e h^f s^k \quad (43)$$

После подстановки в уравнение (43) размерности каждого из аргументов можем выписать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} b + c + d + e &= 0 \\ a - b - 3c - d + e + f + k &= 0 \\ a + b + 2d + 3e &= 0 \\ d + e &= 0 \end{aligned}$$

Разрешая эти уравнения относительно произвольных показателей степени a , d и k , получим

$$b = -a + d; \quad c = a - d; \quad e = -d; \quad f = a - k$$

После соответствующей подстановки и простых преобразований наше уравнение (43) можно переписать так:

$$\gamma = \text{const} \left(\frac{\rho v h}{\mu} \right)^a \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{c}{r} \right)^d \left(\frac{s}{h} \right)^k$$

Ввиду того что размерность отношения $\frac{\mu}{z}$ и $\frac{c}{e}$ одна и та же,

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{c}{r}\right)^d = \text{const};$$

поэтому, окончательно имеем:

$$\gamma = f(R_c, \lambda) \quad (44)$$

Таким образом, передний угол резца зависит не только от рода обрабатываемого материала, но при данном периоде резания T и от взятых режимов резания, — скорости резания, сечения стружки и удлинения λ (или, что то же, от глубины резания и от подачи). Иначе говоря, каждому взятому режиму резания для данного обрабатываемого материала соответствует своя величина переднего угла резца.

При увеличении переднего угла от нуля до некоторой величины выигрыш от уменьшения коэффициента лобового сопротивления c_x (вследствие того, что резец воспринимает на себя меньшую часть скоростного напора) полностью компенсирует возрастание теплового износа, т. к. уменьшается сам скоростной напор. При дальнейшем увеличении переднего угла главную роль начинает играть тепловой износ.

Для того чтобы хотя бы приблизительно оценить влияние каждого из параметров, определяющих режим резания на изменение переднего угла резца, напишем нашу зависимость (44) в развернутом виде:

$$\gamma = \text{const} (R_c)^a (\lambda)^b = \text{const} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a \frac{1}{v^a} \frac{1}{h^{a/2} s^{a/2}} \left(\frac{h}{s}\right)^b$$

После простого преобразования, будем иметь:

$$\gamma = \frac{\text{const}}{v^a} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a h^{(b-\frac{a}{2})} s^{-(b+\frac{a}{2})} \quad (45)$$

Если принять (подобно предыдущему) значение показателей степени удлинения λ и числа Рейнольдса R_c равным соответственно $b = \frac{1}{8}$ и $a = \frac{1}{4}$, то формула (45) переписется:

$$\gamma = \frac{\text{const}}{v^{0,25}} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{0,25} s^{-0,25} \quad (46)$$

При постоянной скорости резания и небольшого диапазона изменения переднего угла для данного обрабатываемого материала можно написать, что

$$\gamma \cong \frac{\text{const}}{\sqrt[4]{s}}$$

Так как число Рейнольдса может иметь любое из следующих видов:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_c} &= \frac{\mu}{\rho v s} = \text{const} \frac{\mu}{\rho v h} = \text{const}' \frac{\mu}{\rho v \sqrt{F}}, \\ \gamma &\cong \frac{\text{const}}{\sqrt[4]{F}} \cong \frac{\text{const}'}{\sqrt[4]{s}} \cong \text{const}'' \sqrt[8]{\frac{h}{s^3}} \end{aligned} \quad (47)$$

то это можно формулировать так: при постоянном удлинении стружки λ изменение переднего угла резца обратно пропорционально корню восьмой степени из поперечного сечения снимаемой стружки; при постоянной глубине резания изменение переднего угла обратно пропорционально корню четвертой степени из подачи и, наконец, при переменной глубине резания и подаче передний угол резца прямо про-

порционален корню восьмой степени из глубины резания и обратно пропорционален корню восьмой степени из куба подачи.

Как видим из формулы (47), влияние подачи s на изменение переднего угла значительно сильнее, чем глубины резания h .

Для разных обрабатываемых материалов величина $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^a$ не только изменяет значение постоянного const , но также изменяет и показатель степени при поперечном сечении снимаемой стружки F , подаче s и глубине резания h в уравнении (46). Однако, для малого диапазона скоростей показатели степени будут меняться незначительно. Конечно, все наши рассуждения и выводы будут верны только до тех пор, пока мы не достигнем области неустойчивого режима резания.

Ко всему сказанному следует добавить еще влияние одного фактора, умышленно опущенного нами для упрощения наших рассуждений, тем более, что влияние этого фактора изменяет лишь количественную, но не качественную сторону происходящих явлений.

Мы имеем в виду ухудшение теплового режима работы резца в связи с увеличением переднего угла. Коротко это влияние можно формулировать так: если данному режиму резания соответствует определенное значение переднего угла, то ухудшение теплового режима работы резца изменяет этот наиболее выгодный угол в сторону его уменьшения.

Для нас теперь также понятно, что охлаждение режущей поверхности действует в обратную сторону, а именно: способствует увеличению переднего угла резца.

Опыты Никольсона со сталью средней твердости подтверждают, что действительно существует свое определенное значение переднего угла резца, при котором период резания будет максимальным. Так, для указанной стали период резания вначале увеличивается вместе с увеличением угла резания, пока этот угол не будет равен 75° ; при дальнейшем увеличении угла резания период резания уменьшается (ввиду того, что задний угол оставался неизменным, увеличение угла резания указывает на увеличение переднего угла резца).

Как видим, дать какую-либо более развернутую математическую связь между передним углом резца и его аргументами не представляется никакой возможности, кроме полученных нами общих формул (44, 47). Таковую зависимость для ряда частных случаев можно получить только опытным путем.

Отсюда для нас становится ясной роль опытного токаря-стахановца, который нередко для каждого частного случая не только не придерживается установленных стандартами величин передних углов резца для того или иного обрабатываемого материала, но так же идет на полное изменение всей „геометрии“ резца.

Угол возвышения режущего лезвия

Отделение стружки происходит всегда по двум направлениям — со стороны буртика обработки (в направлении подачи) и перпендикулярно направлению подачи. Это отделение металла, идущего в стружку, со стороны направления радиального усилия, носит название бокового резания.

Обтекание режущей части инструментов пластическим потоком металлов происходит не только от режущей кромки, но и от так называемой вспомогательной режущей кромки. Вследствие этого движение каждой отдельной стружки нашего потока складывается из двух движений — перпендикулярных режущей и вспомогательной кромкам резца.

На рис. 3 указано действительное движение одной из стружек потока. Как бы ни было мало значение бокового резания, оно все же оказывает свое влияние на характер стекания струй потока. Конечно, это влияние будет возрастать вместе с увеличением подачи и уменьшением глубины резания. Ясно также, что по мере приближения к вспомогательному лезвию резца, боковое резание оказывает все большее влияние на характер стекания струй.

Значит, возвышение режущего лезвия (безразлично, положителен или отрицателен угол возвышения) улучшает условия обтекания режущей поверхности со стороны вспомогательного режущего лезвия. Чем больше угол возвышения режущего лезвия, тем больше мы приближаемся к характеру растекания струй, указанному на рис. 5.

Получается, что при постоянных значениях заднего угла резца и угла заострения, возвышение режущего лезвия как бы увеличивает передний угол. Увеличение же переднего угла (в определенных пределах) уменьшает наростообразование, уменьшает коэффициент лобового сопротивления и увеличивает период резания.

С точки зрения расхода потребной на резание мощности практически безразлично, имеет ли резец положительный или отрицательный угол возвышения режущего лезвия, ибо одинаковому характеру растекания струй будет соответствовать то же значение коэффициента лобового сопротивления, а следовательно, и давления резания. Однако, стойкость этих резцов будет разной; она будет большей для резца с положительным углом возвышения режущего лезвия (носик резца занижен). Это происходит потому, что у резца с положительным возвышением режущего лезвия трехгранный угол при вершине больше, чем у второго резца. Поэтому такой резец работает в более благоприятных тепловых условиях.

Очевидно, для грубых, обдирочных режимов резания, которые связаны с большим выделением тепла (и притом, когда в большинстве случаев работа ведется без охлаждения) целесообразно применение резцов с положительным углом возвышения режущего лезвия.

Влияние толщины пограничного слоя на период резания.

Влияние пограничного потока пластического металла, проходящего за заднюю грань резца, на величину периода резания, огромно. В самом деле, стоит только допустить, что никакого пограничного потока не существует, что процесс стружкообразования протекает так, как это трактуется современной теорией резания металлов, и что, следовательно, мы имеем дело исключительно с физикой твердого тела, — и мы убедимся, что в этом случае резец едва ли мог работать так, как он работает в действительности.

Каждый обрабатываемый материал обладает свойством упругости; поэтому при произвольно большой величине заднего угла резец всегда будет испытывать со стороны своей задней грани значительное давление. Такое противодействие обрабатываемого материала на заднюю грань резца может быть (в зависимости от „геометрии“ резца и взятых режимов резания) или больше, или меньше, или равно усилию подачи P_n .

В самом деле, усилие подачи равно геометрической сумме горизонтальной составляющей противодействия на заднюю грань резца



Рис. 3

N_x и горизонтальной составляющей главного усилия резания R_x^b . Поэтому даже при усилии подачи, равным нулю, или при отрицательной его величине, противодействие на заднюю грань резца может быть весьма значительным. Чему же равно это противодействие?

Очевидно, оно равно равнодействующей R_x напряжений пластических и упругих деформаций той части обрабатываемого материала, которая находится в контакте с задней гранью резца (см. рис. 4). Работа трения характеризуется нормальным давлением P , величиной коэффициента трения f и скоростью резания v . При режимах резания, применяемых в настоящее время (особенно, если работа ведется без охлаждения), работа трения может быть настолько значительной, что резец должен был бы чрезвычайно быстро выйти из строя. Если же принять во внимание, что твердые частицы нароста непрерывно протаскиваются за заднюю грань резца и царапают ее, то условия работы резца становятся еще более тяжелыми.

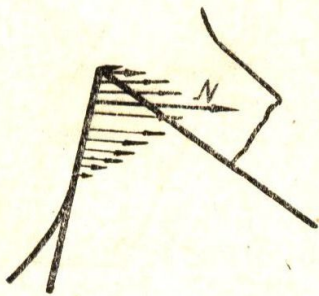


Рис. 4

Почему же резец все таки работает сравнительно долгое время? Почему правильно заточенный резец во многих случаях полностью сохраняет свою заднюю грань, в то время как его режущая поверхность уже затупилась?

Объяснить это можно только тем, что мы имеем дело не с твердым телом, а как бы с жидкостью, правда, очень вязкой и плотной что, следовательно, мы должны учитывать не коэффициент трения f твердого тела по твердому, а внутреннее μ вязкой жидкости.

Иначе говоря, мы имеем дело не с сухим трением, а с жидкостным или полужидкостным. В то время, как внутреннее трение μ вязкой жидкости в первую очередь зависит от скорости (по закону Ньютона), коэффициент трения f в твердых телах почти не зависит от скорости (по закону Кулона).

Если это так, то считая, что явления, происходящие при процессе резания металлов, подчиняются законам физики твердого тела, — мы никогда не должны были бы получать степенной зависимости закона „ $T—V$ “ (если, конечно, мы не доходим до критической скорости резания).

Более того — так как с увеличением скорости коэффициент трения f всегда уменьшается и давление резания также слегка падает, работа трения с увеличением скорости должна была бы увеличиваться в убывающей степени, а следовательно, в такой же мере изменялась бы и стойкость резца.

Если бы не было наростообразования и если бы частицы нароста не протаскивались за заднюю грань резца, мы вправе были бы считать трение металла о заднюю грань резца своего рода жидкостным трением. Однако, дело обстоит несколько иначе, так как частицы нароста срываются с большой частотой (по опытам Шверда нарост срывается до 50 раз в секунду). В зависимости от интенсивности срывания нароста за заднюю грань резца мы будем иметь или полужидкостное, или полусухое трение.

Очевидно также, что на характер того или иного вида трения оказывает большое влияние толщина пограничного потока. Если „глубина“ пограничного потока достаточна, то частицы нароста, проходя за заднюю грань резца, „тонут“ в этом потоке. Наоборот, при срывании нароста по мере некоторого его накопления (т. е. когда частицы нароста велики, а толщина пограничного слоя недостаточна) мы имеем в большей мере полусухое трение, способствующее более быстрому износу резца.

Отчего же зависит толщина пограничного слоя?

В первую очередь она зависит от рода обрабатываемого материала, вернее от величины его предела текучести. Далее, очевидно, значение величины взятой подачи. Чем с большей подачей мы работаем, тем больше толщина пограничного потока.

Точно также толщина пограничного потока увеличивается с уменьшением заднего угла резца. Повидимому, глубина резания никакого значения не имеет.

Что же касается скорости резания, то тут без проведения соответствующего эксперимента трудно наперед сказать — оказывает ли скорость резания какое-либо влияние на изменения толщины пограничного слоя или нет. На первый взгляд может показаться, что скорость резания может определять лишь характер пограничного потока, но не его размеры. Наши металлографические измерения толщины пограничного потока для черновой обработки хромоникелевой стали марки „ХЗН“ резцами системы „крыло“ показали эту толщину равной $\delta = 0,08$ мм.

Влияние заднего угла

Задний угол оказывает весьма существенное влияние на величину периода резания. Как будет подробно рассмотрено дальше, задний угол в значительной степени влияет также на усилие подачи; следовательно, величина заднего угла должна определяться не только физическими свойствами обрабатываемого материала, но так же и диаметром, по которому производится обточка, и принятой величиной подачи.

При слишком малом заднем угле резец со стороны его задней грани подгорает и быстро выходит из строя; чрезмерное же увеличение заднего угла приводит к другим нежелательным обстоятельствам. Во-первых, сам процесс резания протекает ненормально, т. к. работа происходит с переменным сечением стружки (резец то углубляется сверх установленной подачи, то под влиянием возросшего усилия подачи отжимается обратно); во-вторых, увеличение заднего угла уменьшает угол заострения резца, а поэтому резец работает при более тяжелом температурном режиме.

Наконец, увеличение заднего угла может настолько уменьшить толщину пограничного потока, что частицы нароста при своем прохождении за заднюю грань резца не „потонут“ в пограничном потоке, а будут царапать эту грань.

Поэтому со стойкостной точки зрения задний угол резца должен быть таковым, чтобы только обеспечить соответствующую толщину пограничного потока, а именно толщину, достаточную для свободного прохождения твердых частиц нароста за заднюю грань резца.

Удобообтекаемые резцы

Основное преимущество удобообтекаемых резцов перед обычными резцами заключается в том, что наряду с уменьшением давления резания (а следовательно, и уменьшением расхода потребляемой мощности) они являются в то же время и более стойкими. Так как давление резания есть часть скоростного напора, определяемая коэффициентом лобового сопротивления, то очевидно, что давление резания для удобообтекаемых резцов будет меньшим, несмотря на то, что величина скоростного напора несколько увеличивается. Почему увеличивается скоростной напор?

В силу более хороших условий обтекания металл, идущий в

стружку, в меньшей степени деформируется (получается меньший коэффициент усадки), меньше нагревается; поэтому плотность его ρ больше; следовательно, при данной скорости резания v и сечении снимаемой стружки F , скоростной напор увеличивается.

Напишем общий вид формулы давления резания:

а) для обычного резца:

$$P = c_x \rho F v^2;$$

б) для удобообтекаемого резца при том же режиме резания:

$$P_1 = c_{x1} \rho_1 F v^2.$$

На основании сказанного можно написать: $c_{x1} < c_x$; $\rho_1 > \rho$. Однако, в то время, как плотность ρ_1 не на много разнится от ρ , разница в коэффициенте лобового сопротивления для удачно подобранных профилей режущей поверхности может быть весьма значительной (вспомним, что в гидромеханике фигурируют удобообтекаемые тела, профильное сопротивление которых стремится к нулю).

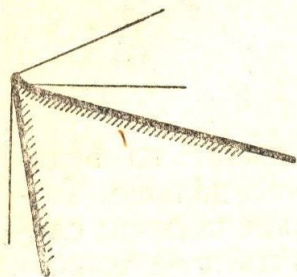


Рис. 5

Поэтому можно утверждать, что всегда $P_1 < P$.

Таким образом, несмотря на увеличение скоростного напора, *удобообтекаемая режущая поверхность воспринимает на себя меньшую часть этого скоростного напора.*

Теперь перейдем к вопросу о стойкости удобообтекаемых резцов. Так как удобообтекаемый резец дает при прочих равных условиях работы уменьшение давления резания, то механический износ его режущей поверхности уменьшается.

На первый взгляд может показаться странным, но для данного обрабатываемого материала и взятых режимов резания, именно *увеличение скоростного напора и является причиной уменьшения теплового износа режущей поверхности.* Происходит это потому, что увеличение скоростного напора (вследствие увеличения плотности ρ) обязательно связано с уменьшением теплообразования, а если это так, то материал резца не так размягчается, его сопротивление деформации сжатия $k_{сж}$ не так сильно падает.

Следует еще учесть одно обстоятельство. Для удобообтекаемых резцов условия наростообразования и накопления его менее благоприятны, чем для резцов обычной конструкции. Поэтому мы имеем еще дополнительный выигрыш как в механическом, так и в тепловом износе.

Принимая во внимание сказанное, можно утверждать, что *стойкость удобообтекаемых резцов будет выше, чем стойкость обычных резцов.* Так как криволинейную режущую поверхность можно рассматривать состоящей из бесконечно малых прямых площадок с переменным передним углом, то казалось бы, что всегда можно взять резец обычной конструкции, но с каким-то увеличенным передним углом с тем, чтобы оба эти резца были равноценными, хотя бы в смысле расходуемой ими на резание мощности. Однако, выполнить это невозможно, т. к. очевидно обычному резцу нужно было бы настолько увеличить передний угол, что мы попали бы в область неустойчивого режима, при котором практически нельзя работать. Рассмотрим несколько видов удобообтекаемых резцов.

На рис. 5 приведен резец, получивший в настоящее время довольно большое распространение на наших заводах. От обычного резца он отличается только своей приемной частью. Смысл такого

гидравлического приемника (иначе — направляющей части) становится ясным из рис. 6. Направляющая часть *ab* подхватывает стружки потока и не дает им растекаться у набегающей кромки резца, тем самым препятствуя наростообразованию. Резцы с удобообтекаемой приемной частью особенно ценны при обработке вязких сталей, предрасположенных к усиленному наростообразованию.

Вследствие того, что большая часть режущей поверхности не является удобообтекаемой, выигрыш в расходуемой мощности незначителен; главное — увеличение периода резания и улучшение частоты обработки.

К недостаткам подобных резцов можно отнести трудность их изготовления при централизованной заточке инструмента. Заправка „гребешка“ у режущей кромки резца производится самими токарями. Подобные резцы изготавливаются только из быстрорежущей стали; твердые сплавы обладают слишком большой хрупкостью.

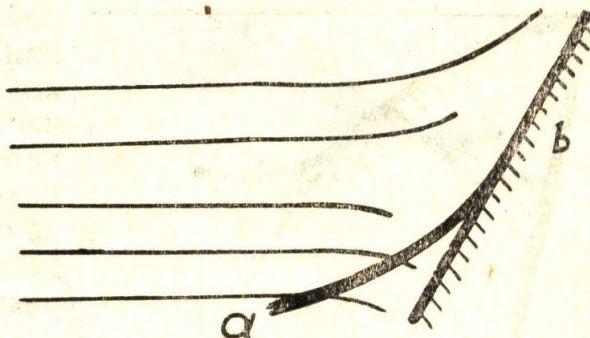


Рис. 6

На рис. 7 приведен резец с вогнутой удобообтекаемой режущей поверхностью. Он является как бы естественным развитием предыдущего резца. Благодаря тому, что вся его режущая поверхность хорошо обтекаема, давление резания значительно падает.

Такой резец хорошо работает при чистовых и получистовых режимах резания, дает приличную чистоту обрабатываемой поверхности, малую усадку стружки, хорошую ее завивку. Его режущее лезвие и приемная часть находятся в довольно тяжелых температурных условиях.

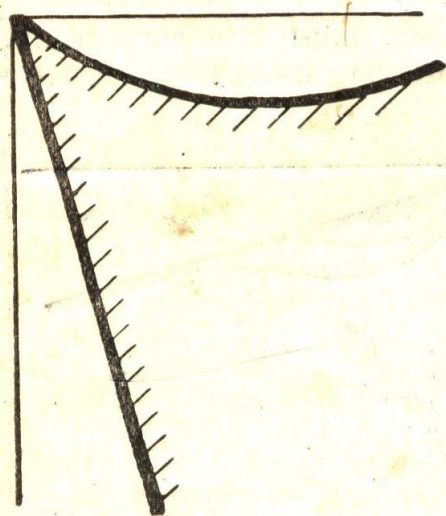


Рис. 7

Несмотря на это стойкость его выше, чем для обычного резца. При грубых обдирочных режимах резания разница в периоде резания двух сравниваемых резцов уменьшается и даже может получиться, что стойкость резца с вогнутой режущей поверхностью будет меньшей.

К недостаткам этих резцов нужно также отнести сложность их заточки. При применении заточного приспособления и профильного шлифовального камня заточка на много бы упростилась.

Целесообразность такой заточки оправдывается тем, что удельный вес резцов из быстрорежущей стали все еще велик. Кроме того, в настоящее время стоит вопрос о внедрении заменителей быстрорежущей стали.

На рис. 8 приведен резец с удобообтекаемой выпуклой режущей поверхностью. Такой вид резцов мы назвали крыловидными, так как их режущая поверхность очерчена профилем, аналогичным профилю дужки крыла.

Обладея всеми достоинствами вогнутой режущей поверхности, резец системы „крыло“ имеет перед предыдущим резцом ряд преимуществ. Носовая часть его более массивна, следовательно, резец лучше отводит тепло и менее нагревается. Значит, при прочих рав-

ных условиях работы стойкость такого резца выше стойкости остальных рассмотренных нами.

Износ режущей поверхности происходит так, как это показано на рис. 9. Через известный промежуток времени на режущей поверхности появляется лунка (на рис. 9 заштрихованный участок). Месторасположение этой лунки или совпадает с центром давления

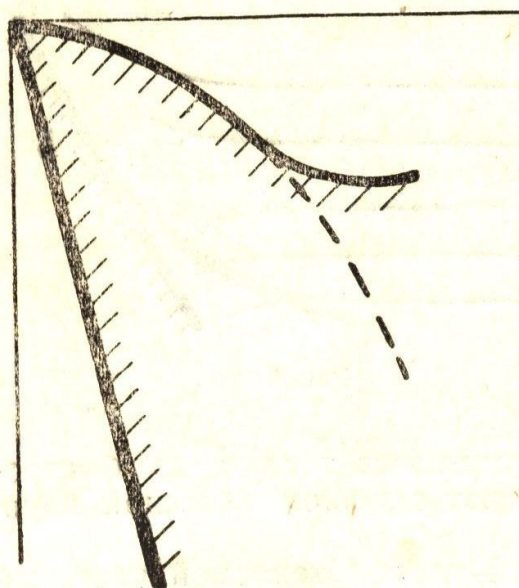


Рис. 8

(т. е. с точкой приложения равнодействующей сопротивления резанию) или же (что более вероятно) несколько отодвигается в сторону носовой части резца, принимая во внимание картину нагрева резца. (Опыты Рейхеля показали, что температурные кривые располагаются примерно концентрично по отношению к вершине резца).

Далее, размеры лунки увеличиваются, но это увеличение происходит не в равной степени: оно замедлено в сторону режущей кромки. По мере дальнейшей выработки лунки, центр давления также перемещается в сторону набегающей кромки резца. Если бы лунка могла дойти до самого режущего лезвия, то мы имели бы так называемое самозатачивание резца.

Однако, вследствие ли срыва нароста, изменения в сопротивлении подаче или под влиянием иных случайных причин, режущая кромка заворачивается (на рис. 9 указано стрелкой), и резец садится.

Следовательно, период резания будет большим для того резца, для которого в начальный момент работы центр давления будет отстоять возможно дальше от режущей кромки. Для выпуклой же режущей поверхности такое удаление центра давления и будет наибольшим, а потому можно утверждать, что стойкость резца системы „крыло“ будет выше, чем стойкость прочих рассмотренных выше резцов.

Преимущество рассматриваемого резца перед вогнутым состоит еще в простоте его изготовления и заточки. Выпуклую режущую поверхность можно заточить не только профильным камнем, но и обычным (помощью копира). В тех же случаях, когда кривизну режущей поверхности можно выполнить по некоторому радиусу, заточка еще более упрощается.

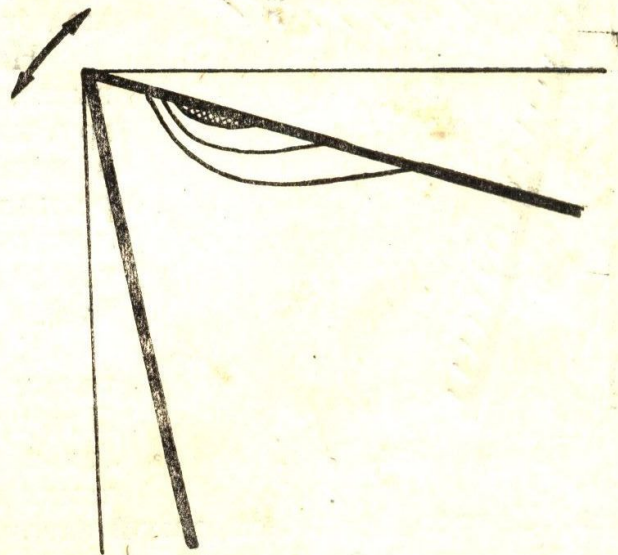


Рис. 9

Следовательно резцы системы „крыло“ могут применяться на заводах, на которых поставлена принудительная смена инструментов, и центральная заточка. Чрезвычайно важно, что подобные резцы могут быть изготовлены из твердых сплавов, т. к. опасность выкрашивания режущего лезвия при их заточке стпадает.

Из приведенного рис. 10 видно, что резец системы „крыло“

имеет больший припуск на нормальный износ режущей поверхности, чем обычный резец (двойная штриховка) и еще больший припуск, чем для вогнутого (одинарная штриховка). На рис. 10 примерно указаны точки приложения равнодействующей сопротивления резанию для сравниваемых резцов.

Нужно сказать, что влияние нароста оказывает на резец „крыло“ значительно более вредное влияние, чем на обычный резец. Самым лучшим было бы устройство направляющей части, как это указано на рис. 11. Однако от него нужно заранее отказаться, т. к. изготовление и заточка подобных резцов практически невозможны.

Для уменьшения наростообразования (хотя бы частично) в нашем распоряжении имеется еще лишь два способа, а именно или же дать угол возвышения режущего лезвия, или было бы еще более эффективно — заполнить режущую поверхность двойкой кривизны. Подобные сферические резцы особенно ценны при обработке вязких сталей (рис. 12).

В качестве иллюстрации приведем пример. В то время, как из-за обильного наростообразования мы по нашим опытам с вязкими сталями получали уменьшение давления резания примерно на 20—25%,

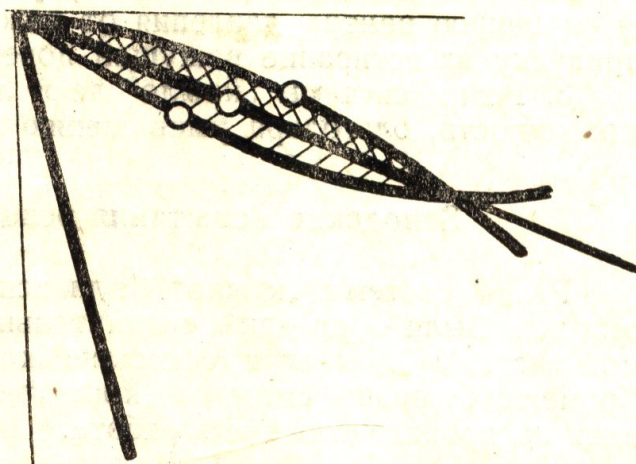


Рис. 10

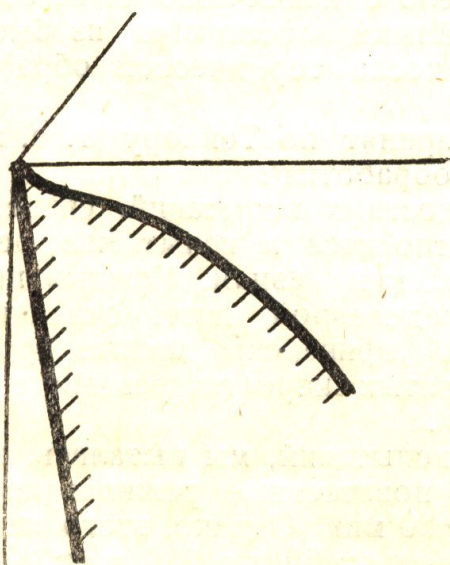


Рис. 11

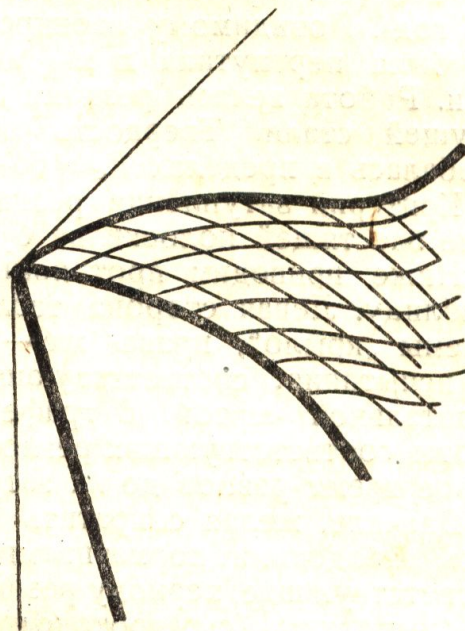


Рис. 12

эта разница для сферического резца доходила до 40%, а в отдельных случаях и немного больше.

Конечно, изготовление и заточка сферических резцов представляют уже известные трудности. И все же, если они дадут большой выигрыш в расходуемой на резание мощности и в стойкости, можно рассчитывать на их распространение.

Итак, относительно удобообтекаемых резцов системы „крыло“ мы можем дать следующее резюме.

1. Резцы системы „крыло“ дают уменьшение потребляемой мощности вследствие: а) уменьшения коэффициента лобового сопротивле-

ния, уменьшения деформации металла, отходящего в стружку;
б) уменьшения наростообразования.

2. Резцы системы „крыло“ обладают большей стойкостью, благодаря: а) уменьшению давления резания, б) уменьшению теплообразования при процессе резания, в) уменьшению наростообразования, г) смещению центра давления от режущей кромки, д) увеличенному припуску на истирание режущей поверхности.

3. Резцы системы „крыло“ дают лучшую чистоту обрабатываемой поверхности, благодаря уменьшению наростообразования.

Заводские испытания резцов системы „крыло“

Резцы системы „крыло“ были испытаны на одном из московских заводов. Были проведены сравнительные стойкостные испытания резцов системы „крыло“ и нормальных заводских (по Промстандарту). Кроме того, резцы системы „крыло“ испытывались в цеховых условиях на производственной работе.

Стойкостные испытания

Стойкостные испытания проводились в лаборатории резания завода на токарном станке *VDF* мощностью 11,5 кв. Работа велась без охлаждения. Обрабатываемый материал углеродистая машино-подделочная сталь „ст-5“, твердостью по Бринеллю $H_B = 174$ и сталь марки „50Г“, твердость $H_B = 180$. Твердость этой же стали марки 50Г $H_B = 235$ (см. протоколы испытания от 11/II, 12/II, 14/II и т. д. за 1938 год). Повидимому маркировка некоторых из испытуемых болванок была перепутана и мы имели дело с каким-либо иным сортом стали. Работа велась резцами с напайными пластинками из быстро-режущей стали. Твердость резцов после термической обработки колебалась в пределах $R_c = 60-62$.

Критерий затупления резца был принят по Тейлору (т. е. появление блестящей полоски на буртике обработки).

Ниже приводим протоколы стойкостных испытаний, сведенных в таблицу. Левая сторона таблицы относится к испытанию резцов системы „крыло“, правая же — к заводским резцам. Каждый протокол испытания, соответствующий определенной дате, отделен горизонтальной чертой. В графе 6 и 11 приведены данные времени работы соответствующих резцов при взятых скоростях резания и суммарное время резцов до их затупления.

Вначале, желая сократить время испытаний, мы пытались, пользуясь заводскими нормативами, дать повышенные режимы резания, соответствующие периоду резания $T = 20$ мин. Однако, этого не удалось выполнить (см. протокол испытания от 6/I по 28/I и от 30/I по 10/II). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что за весь этот период времени мы имели ненормальное затупление резцов. В то время, как режущая поверхность совершенно не имела никаких следов истирания (лунки), носик резца быстро подгорал и сминался. Повидимому, имело значение большое биение шпинделя и мертвый ход в поперечных салазках каретки суппорта. Кроме того, для резцов системы „крыло“ малый радиус закругления носика служил причиной такого ненормального затупления. Пришлось намного снизить скорость резания для того, чтобы устранить случайные результаты.

Так как для нас неизвестен степенной показатель стойкостной зависимости для резцов системы „крыло“ (для этого нужно более длительное испытание, которое не могло быть проведено в заводских

условиях), то сравнение стойкостей для этих двух видов резцов по „приведенной“ скорости может быть только приблизительным.

Если бы мы приняли для резца системы „крыло“ степенной показатель стойкостной зависимости по данным Тейлора для углеродистой стали и быстрорежущего резца 8, то увидим, что в большинстве случаев мы имеем значительное преимущество этого резца перед обычным.

По протоколу испытания от 28 января мы имеем следующие данные: резец системы „крыло“ при скорости 19,8 мт/мин. затупился за время 8,96 мин. Время затупления обычного заводского резца при тех же режимах работы, но при скорости $v = 17,4$ мт/мин. составляет 2,7 мин. Время затупления резца системы „крыло“, отнесенное к скорости 17,8 мт/мин., составляет $T = 8,98 \left(\frac{19,8}{17,4}\right)^8 = 25,2$ мин., т. е. этот резец обладает большей стойкостью, примерно, в 9 раз.

Пересчеты по протоколам испытания от 11/II по 15/II (включительно) показывают повышение стойкости резца системы „крыло“ против обычного соответственно: в 6,8; 5,8 и 5 раз.

Подчеркиваем еще раз, что эти сравнения являются грубо ориентировочными. Для нас важно сейчас лишь то, что выдвигаемые нами теоретические соображения о повышенной стойкости удобообтекаемых резцов настоящими опытами подтверждаются.

Протокол стойкостных испытаний токарных резцов (проходных), проводившихся на заводе имени Калинина

Дата	№ резца	Резцы системы "крыло"						Заводские резцы (по пром. стандарту)					
		Режимы резания			Примечание	Режимы резания			Режимы резания			Примечание	
		v м/мин.	h	s		Т мин.	v м/мин.	h	s	Т мин.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
6/1		20,8 22,2 34,0	5,4 5,35 5,5	0,95 0,95 0,95	13,88 13,54 1,91 29,33		20,8 — —	4,8 — —	0,95 — —	2,83 — —			
6/1		24,2	5,4	1,07	6,43	Станок дрожит	21,2	?	0,91	—	Режим нельзя было осуществить		
		26,0 27,8	5,2 4,95	1,23 1,23	4,65 3,63 14,72	Резец не затупился	— — —	— — —	— — —	— — —			
28/1	2	19,8	5,95	0,95	8,96		17,4	6,0	0,95	2,7			
28/1	2	19,8 17,4	6,0 6,0	0,95 0,95	7,74 1,27 9,01		17,4 17,4 17,4	4,0 6,0	0,95 0,95	1,37 —			
28/1		11,0 12,1 12,9 12,0	6,0 6,0 6,0 3,0	0,95 0,95 0,95 0,95	12,6 17,95 14,7 1,5 46,75								
29/1	6	16,7 18,0	6,0 6,0	0,95 0,95	35,0 2,8 37,8						Резец быстро "сел" (по типу Клопштока)		

Материал резцов — быстрорежущая сталь $R_c = 60 - 62$
 Обрабатываемый материал — сталь, ст-5^а $H_B = 174$

Дата	№ резца	Резцы системы "крыло"						Заводские резцы (по пром. стандарту)				Примечание
		Режимы резания			Примечание	Режимы резания			Время T, мин.			
		v м/мин.	h	s		v м/мин.	h	s				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
30/1							14,2 16,4	6,0 6,0	0,95 0,95	30,2 26,3 56,5	Не притупился.	
30/1	2	29,0	4,0	0,95	1,41	Сел с угла	29,0	4,0	0,95	1,12		
	5	29,0	4,0	0,95	1,4	"	29,0	4,0	0,95	0,23		
	2	29,0	4,0	0,95	0,82	"						
		29,0	4,0	0,95	0,75	"						
		30,4	4,0	0,95	0,45	"						
		30,1	4,0	0,95	0,8	"	30,1	4,0	0,95	0,15		
10/1	1	25,7	4,0	0,95	4,35	Дрожание суппорта	25,7	4,0	0,95	1,73		
						Резец затупился не-	23,0	4,0	0,95	1,38		
						нормально						
10/II	5	24,4	4,0	0,95	4,65		26,0	4,0	0,95	2,3	Резец сел с угла	
10/II	3	14,5	4,0	0,95	24,0	Материал резцов—быстрорежущая сталь $R_c=60-62$						
						Обработываемый материал—сталь "50Г", $H_B=180$						
11/II	3	13,7	4,0	0,95	14,0							
11/II	3	16,1	4,0	0,95	12,3	Продолжение испытаний						
						резца № 3						
		16,1	4,0	0,95	3,45							
		15,0	4,0	0,95	16,0							
		17,2	4,0	0,95	12,45							
		15,7	4,0	0,95	12,4		14,8	4,0	0,95	7,37		
		15,7	4,0	0,95	4,0		16,0	4,0	0,95	9,9		
					98,6					17,27		

Дата	Режцы системы „крыло“						Заводские режцы (по пром. стандарту)						Примечание
	№ режца	Режимы резания			Примечание	Режимы резания			Время T мин.	12			
		v м/мин.	h	s		v м/мин.	h	s					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		

Сравнительная таблица

„Крыло“
Заводской режец

v м/мин. | 14,0 | 15,0 | 16,0 | 17,0
T мин. | 38,0 | 28,15 | 9,9 | 4,0
T мин. | 7,37 | — | — | —

Материал режцов — быстрорежущая сталь $R_c = 60-62$
Обрабатываемый материал — сталь „50Г“ $H_B = 235$

11/II	7	17,0	4,0	0,95	3,42		—	—	—	—	—	—
		16,0	4,0	0,95	3,75		—	—	—	—	—	—
		15,1	4,0	0,95	3,95		—	—	—	—	—	—
		14,0	4,0	0,95	4,04		—	—	—	—	—	—
		16,5	4,0	0,95	3,25		—	—	—	—	—	—
		15,3	4,0	0,95	3,35		—	—	—	—	—	—
		14,1	4,0	0,95	15,8		—	—	—	—	—	—
		16,35	4,0	0,95	12,1		—	—	—	—	—	—
12/II	7	14,8	4,0	0,95	12,5	Продолж. испытаний режца № 7	—	—	—	—	—	—
		16,6	4,0	0,95	9,9		—	—	—	—	—	—
		14,7	4,0	0,95	9,8		—	—	—	—	—	—
		16,3	4,0	0,95	7,65		—	—	—	—	—	—
		16,3	4,0	0,95	4,6	$l = 750$ мм	—	—	—	—	—	—
		14,8	4,0	0,95	9,75	$d = 54,2$ мм	—	—	—	—	—	—
		16,7	4,0	0,95	8,1	$l/d = 13,8$ мм	—	—	—	—	—	—
		14,8	4,0	0,95	8,0		—	—	—	—	—	—
14/II	7	16,5	4,0	0,95	6,25	$l = 630$ мм	—	—	—	—	—	—
		16,1	4,0	0,95	31,6	$d = 54,8$ мм	—	—	—	—	—	—
		15,1	4,0	0,95	7,5	$l/d = 11,5$ мм	—	—	—	—	—	—

Резцы системы „крыло“

№ резца	Режимы резания				Примечание	Заводские резцы (по пром. стандарту)				
	Режимы резания		Режимы резания			Режимы резания		Время T мин.	Примечание	
	v м/мин.	h	с	h		v м/мин.	h			s
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15/II	16,5	4,0	0,95	15,1	Продолжение испытания резца № 7	15,1	4,0	0,95	23,7	
	19,1	4,0	0,95	15,4	Реж. лезвие защищено оселком	14,1	4,0	0,95	31,3	
				195,81		16,5	4,0	0,95	9,5	
									64,5	

Сравнительная таблица

№ резца	„Крыло“		Заводской резец		Сравнительная таблица		„Крыло“		Заводской резец	
	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.
15/II	22,1	8,95	4,0	0,95	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
	22,0	2,40	4,0	0,95	19,84	54,85	59,7	46,02	—	15,44
	20,6	2,5	4,0	0,95	31,3	23,7	—	9,5	—	—
	24,2	1,95	4,0	0,95	—	—	—	—	—	—
	—	15,8	—	—	—	—	—	—	—	—

Сравнительная таблица

№ резца	„Крыло“		Заводской резец		Сравнительная таблица		„Крыло“		Заводской резец	
	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.	v м/мин.	T мин.
17/II	20,0	2,0	4,0	0,95	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	—
	18,6	2,4	4,0	0,95	25,0	—	11,35	—	1,95	—
	20,4	8,30	4,0	0,95	—	—	6,15	—	—	—
	18,6	8,20	4,0	0,95	—	—	—	—	—	—
	20,2	8,75	4,0	0,95	20,0	20,1	4,0	0,95	3,12	—
	18,4	8,7	4,0	0,95	20,4	20,4	4,0	0,95	6,35	—
	20,0	3,6	4,0	0,95	—	—	4,0	0,95	13,57	—
	—	41,95	—	—	—	—	—	—	17,97	—

„Крыло“
Заводской резец

Нач. 13 цеха, канд. техн. наук (подпись)

Инженер экспериментатор (подпись)

Взяты режимы резания для резца системы „крыло“.

Дата	Подача s	Глубина резания h	Скорость резания v	Время работы резца Т мин.	Примечание
1	2	3	4	5	6
27/II	1,0		10,8		
28/II	1,0		10,8		
2/III	1,5		10,8		
3/III	1,5		10,8		
4/III	1,5		—		
5/III	1,5		10,8		
8/III	2,0		10,8		
26/III	2,0		10,8		
2/IV	2,0	7,0	10,8	60 мин.	
4/IV	2,0	6,5	10,8	35 мин.	
	2,5	7,0	10,8	13 мин.	
		7,0	10,8	52 мин.	
				70 мин.	

Режим осуществлялся одновременно двумя резцами, установленными на 2 супорте

Работа велась одновременно двумя резцами. Стойкость одного 28 мин, второго — 32 мин.

Резец не пригнулся. Вследствие плохой припайки пластина отскочила

Использован токарный резец, который до строжки подвергался троекратной переточке

После 18-минутной работы с подачей 2,0 мм/1 дв. ход, последняя была установлена в 2,5 мм/1 дв. ход без снятия резца и остановки станка

Время затупления резца не фиксировалось

В пределах до 12 мм. Фактически глубина не измерялась

Главный инженер завода (подпись)
Инженер экспериментатор (подпись)

Работа в цеховых условиях резцами системы „крыло“

В цеховых условиях удобообтекаемые резцы системы „крыло“ испытывались на тяжелой строжке. Этот вид испытания был нами принят по нескольким причинам.

Во-первых, на данном заводе наиболее трудоемкие токарные работы велись исключительно резцами с напайными пластинами из твердых сплавов и только незначительная часть сравнительно мелких работ быстрорежущими резцами.

Во-вторых, нам хотелось проверить системы „крыло“ в тяжелых условиях ударной нагрузки (как известно строгальный резец испытывает удар при входе в обрабатываемый материал и при выходе из него).

Наконец, строгальное отделение являлось „узким местом“ завода; поэтому предполагаемое увеличение режимов резания и, следовательно, сокращение времени обработки деталей должно было подчеркнуть выгодность применения резцов системы „крыло“.

Ниже приводим протокол испытания.

Нужно сказать, что качество изготовления и термообработка резцов оставляла желать много лучшего. Как правило, за время обработки одной партии одновременно остроговываемых деталей (8—9 штук) сменялось два резца.

Обрабатываемые детали были покрыты слоем окалина толщиной до полумиллиметра, что вредно отражалось на работоспособности резцов.

Протоколы испытаний строгальных резцов, проводившихся на Московском заводе им. Калинина

Обрабатываемая деталь:..... Деталь №.....

Материал детали: хромоникелевая сталь, марки 045—3299, термообработанная. Механические качества после термообработки $R = 80$ кг/мм.

Резцы типа „крыло“.

Материал резца: быстрорежущая сталь, марки.....(неизвестно).

Твердость по Роквеллу $R_c = 60—62$.

(Резцы термообработке не подвергались).

Данные станка: фирма „Waldrich“, мощностью 18 л. с.

Размеры стола $4,5 \times 1,2$ м.

Длина хода 4,5 м.

Станок имеет два вертикальных и один боковой суппорт.

Установка деталей: одновременно устанавливаются 8—9 штук деталей с промежутком 30—50 мм. Площадь обрабатываемого предмета (суммарная)..... 3600×315 мм.

Фактически употребляемые режимы резания:

$$s = 1 \text{ мм/дв. ход.};$$

$$h = 5—7 \text{ мм};$$

$$v = 10,8 \text{ мт/мин.}$$