

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А. М. РОЗЕНБЕРГ и А. Н. ЕРЕМИН

В процессе резания металлов имеет место весьма значительное трение между передней гранью инструмента и сходящей по ней стружкой, а также между задней гранью и поверхностью резания. Это трение протекает при высоких удельных давлениях на трущихся поверхностях, измеряемых нередко десятками килограммов на квадратный миллиметр. Трение это характерно очень высокими значениями коэффициента трения, что объясняется относительной чистотой трущихся поверхностей, свободных от окислов и адсорбированных пленок. Чистота трущихся поверхностей является результатом того, что одна из трущихся поверхностей, принадлежащая стружке или поверхности резания, только что образована в процессе резания; другая, принадлежащая резцу, непрерывно очищается трением сходящей стружки или поверхности резания. Поэтому коэффициенты трения в процессе резания нередко достигают значений  $\mu \geq 1$ . При высоких скоростях резания трение протекает в условиях высоких температур, могущих достигать 800—1000°. В процессе резания имеются два источника выделения тепла, нагревающего стружку и инструмент. Один источник расположен в зоне деформации стружки (в зоне плоскости сдвига), где выделяется тепло эквивалентное работе, затраченной на деформацию стружки. Другой источник расположен в зоне трения стружки по передней грани инструмента и в зоне трения поверхности резания о заднюю грань инструмента. Здесь выделяется тепло эквивалентное работе трения. Эксперимент показывает, что температуры в зоне трения стружки об инструмент при высоких скоростях резания значительно превосходят температуры в зоне деформации стружки. Таким образом, здесь источником нагрева инструмента является процесс трения.

Все указанное выше должно привести нас к выводу, что трение в процессе износа и затупления режущего инструмента играет главную роль, так как износ инструмента есть не что иное, как истирание его передней и задней граней, с различной интенсивностью протекающее при различных температурах. Как сам процесс истирания осуществляется трением, так и температуры, определяющие его интенсивность, зависят в значительной степени от трения. Поэтому, естественно, без изучения трения, сопровождающего процесс резания, не представляется возможным подойти к построению теории износа и стойкости режущего инструмента. Кроме этого, изучение трения в процессе резания интересно и с точки зрения выявления закономерностей, определяющих протекание деформации стружки, так как не что иное, как коэффициент трения определяет направление равнодействующей силы на передней грани инструмента, а это направление в свою очередь должно по воззрениям, высказанным еще Зворыкиным, определять степень деформации стружки и расположение зоны деформации.

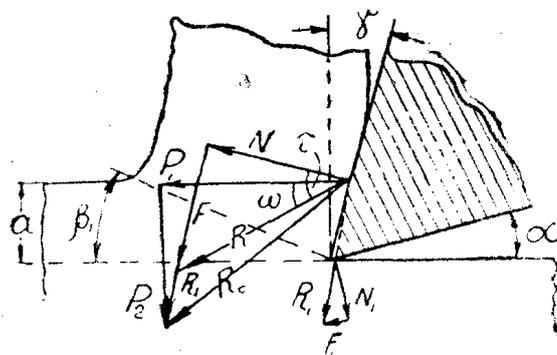
Все эти соображения побудили нас к тому, чтобы поставить работу по экспериментальному изучению трения в процессе резания металлов.

## Метод определения сил трения и коэффициентов трения при резании металлов

Изучение сил трения и коэффициентов трения, имеющих место в процессе резания металлов, можно проводить, лишь осуществляя процесс резания в его нормальном виде. Не представляется возможным это изучение проводить на каком-нибудь упрощенном процессе, например, заставляя одно тело, заменяющее стружку, скользить по другому заменяющему переднюю грань инструмента. Это невозможно потому, что трение в процессе резания протекает в специфичных условиях, характеризующихся очень высокими удельными давлениями, широким диапазоном скоростей и температур и особым состоянием трущихся поверхностей, одна из которых (принадлежащая стружке или поверхности резания) непрерывно скользит по другой (принадлежащей инструменту), осуществляя процесс трения все новыми, вступающими в этот процесс, своими участками, только что возникшими при отделении стружки от металла.

Непосредственное измерение сил трения в процессе резания также вряд ли возможно. Силу трения можно с достаточной точностью определить расчетом, измеряя в опыте при помощи специальных динамометров силы, действующие на инструмент.

Если процесс резания осуществлять наиболее простым из инструментов—резцом (что мы в нашей работе и приняли), то при процессе свободного резания достаточно измерить две составляющих силы резания, одна из которых направлена по направлению скорости резания ( $P_1$ ), другая перпендикулярно поверхности резания ( $P_2$ ). При процессе несвободного резания нужно измерять три составляющих ( $P_z, P_x, P_y$ ). При расчете сил трения и коэффициентов трения нужно принять во внимание, что на всяком режущем инструменте в процессе резания возникают две группы сил, одна из которых расположена на передней грани и непосредственно связана с процессом образования стружки. Другая расположена на задней грани, в



Фиг. 1

процессе образования стружки участия не принимает и определяется упруго-пластическим контактом поверхности резания и задней грани на очень узком участке задней грани, непосредственно примыкающем к режущей кромке. На фиг. 1 группа сил на передней грани реза включает в себя силы  $N$ —нормальную к передней грани,  $F$ —силу трения стружки по резцу,  $R$ —их равнодействующую. Группа сил на задней грани  $N_1, F_1$  и  $R_1$ . Общая равнодействующая

их  $R_0$  разложена для процесса свободного резания на составляющие  $P_1$  и  $P_2$ , которые могут быть измерены в опыте динамометром, так как их направление всегда известно. Если в опыте измерены  $P_1$  и  $P_2$ , не представляет затруднений определить  $R_0$ , но для того чтобы осуществить дальнейшее разделение сил, необходимо их прежде всего уметь разбить на две указанные группы, чтобы из сил, измеренных динамометром, вычесть силы, приложенные на задней грани, так как нас в основном интересуют силы, действующие на передней грани. Для определения сил на задней грани мы пользовались методикой, разработанной проф. Розенбергом, которая была проверена на ряде работ и подробно изложена в статье „Определение сил на задней грани инструмента“.

Определив силы, приложенные на передней грани, не представляет затруднения рассчитать величину силы трения  $F$  и коэффициента трения  $\mu$ , причем коэффициентом трения мы считаем отношение  $\frac{F}{N}$ . Коэффициент трения между стружкой и передней гранью резца нами определялся следующим образом:

$$\mu = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} (\omega + \gamma)$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{P_2'}{P_1'}$$

где  $P_2'$  и  $P_1'$ —силы, измеренные динамометром, за вычетом сил, приложенных на задней грани в тех же направлениях ( $P_2''$  и  $P_1''$ ).

Эти выражения служат для определения коэффициента трения для случая свободного резания, когда динамометром измеряются две составляющих ( $P_1$  и  $P_2$ ) и равнодействующая всех сил на резце направлена в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке.

В случае несвободного резания динамометром измеряются три составляющих ( $P_z$ ,  $P_x$ ,  $P_y$ ). В этом случае коэффициент трения рассчитывается по следующим зависимостям

$$\mu = \operatorname{tg} (\omega + \gamma')$$

$$\operatorname{tg} \gamma' = \operatorname{tg} \gamma \cos [\psi - (90^\circ - \varphi)]$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{P_y'}{P_x'}$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{P_x'}{P_z' \cos \varphi}$$

где  $P'_z$ ,  $P'_x$ ,  $P'_y$ —силы, измеренные динамометром, за вычетом сил на задних гранях.

Опыты показывают, что силы на задних гранях для острых резцов чрезвычайно малы, могут при расчете коэффициента трения оказать заметное влияние лишь на очень тонких стружках и при толщинах больше 0,15 мм могут не приниматься во внимание.

### Условия выполнения опытов

Мы изучали зависимость сил трения и коэффициента трения от следующих факторов:

- 1) обрабатываемого металла,
- 2) толщины срезаемого слоя,
- 3) скорости резания,
- 4) переднего угла резца,
- 5) температуры резания,
- 6) смазки,
- 7) материала режущего инструмента.

Обрабатываемые металлы были нами взяты следующие: сталь, свинец, алюминий, красная медь. Выбор именно таких металлов объясняется следующими соображениями.

Все эти четыре металла имеют четыре различных температуры плавления от 327° для свинца до 1300—1400° для стали. Поэтому на выбранных нами металлах должно было по различному проявиться влияние ско-

рости деформации на их механические характеристики, так как известно, что это влияние тем ниже, чем выше температура плавления металла. Далее эти металлы при достаточной пластичности обладают различной способностью сохранять наклеп, получаемый в результате пластической деформации. Кроме этого, выбранные металлы при резании обладают различными свойствами. Так, сталь и алюминий создают нарост на резце в интервале определенных температур резания, медь же и свинец при любых температурах резания не ниже комнатной обрабатываются без образования нароста.

Скорости резания в опытах были взяты двух порядков: очень малые в пределах от 0,0003 м/мин до 0,76 м/мин и обычные—от 5 до 500 м/мин. Очень малые скорости резания, которые мы будем называть „микроскоростями“, были применены нами по следующим соображениям.

При изменении скорости резания в обычных габаритах, применяемых на производстве скоростей, изменение скорости резания обязательно и неизбежно сопровождается изменением температуры резания. Поэтому при обычных скоростях резания не представляется возможным выделить влияние только собственно скорости на изучаемое явление. Если же производить резание при „микроскоростях“, то тепло, возникающее в процессе резания, успевает распространиться в окружающую зону резания объема металла и практически можно считать, что, изменяя скорость резания до 0,76 м/мин, мы осуществляли процесс резания при постоянной температуре и влияние изменения температуры на изучаемое явление здесь было исключено. Точно так же и изменение размеров стружки и угла резания при высоких скоростях резания сопровождается обязательно изменением температуры резания. При „микроскоростях“ это также исключается. Кроме этого, опыты при микроскоростях были удобны тем, что при резании стали и алюминия на этих скоростях не образуется нароста и инструмент в опыте имеет не искаженную наростом геометрию. Таким образом, общие крайние пределы изменения скоростей в наших опытах превосходили 1 000 000 раз.

При изучении коэффициента трения применялись резцы из быстрорежущей стали и из твердых сплавов Т15К6 и ВК8, что позволило выявить влияние марки режущего сплава на коэффициент трения. Силы резания в опытах с микроскоростями измерялись при помощи специально сконструированного и изготовленного в лаборатории резания металлов ТПИ упругого динамометра. В опытах на высоких скоростях силы измерялись чувствительным гидравлическим динамометром, конструкции лаборатории резания металлов ТПИ.

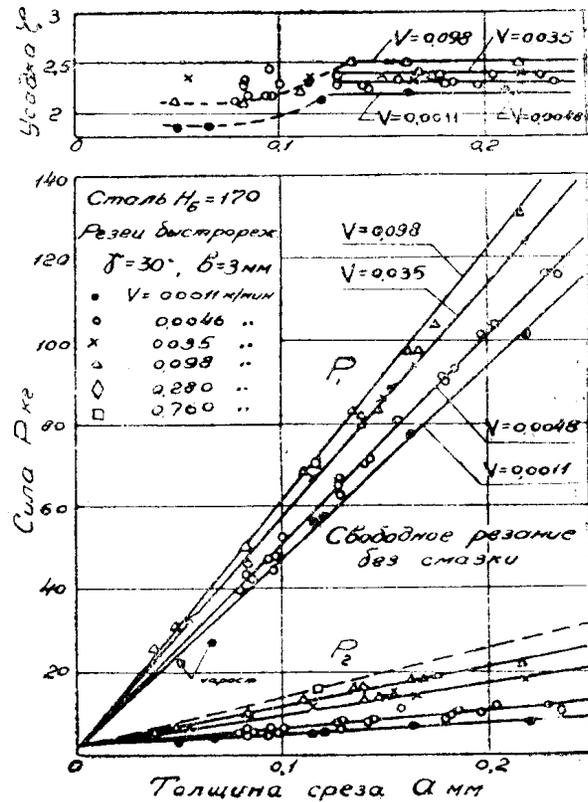
## Результаты опытов по стали

Для опытов была взята сталь  $H_b = 170$  и сталь 20. Опыты на микроскоростях проводились только по стали  $H_b = 170$  методом свободного резания. На микроскоростях применялись резцы из быстрорежущей стали с передними углами  $\gamma = 0^\circ, 8^\circ, 14^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  и  $40^\circ$ . Опыты на микроскоростях проводились процессом строгания полоски стали, имеющей толщину  $b \cong 3$  мм и длину  $\sim 60$  мм. Перед снятием каждой новой стружки резец тщательно доводился по обоим граням, чтобы на режущей кромке совершенно не было дефектов. Опыты проводились как без смазки, так и со смазкой растительным маслом, машинным маслом и однопроцентным раствором мыла в воде.

На фиг. 2 представлены опыты, проведенные без смазки резцом с передним углом  $\gamma = 30^\circ$ , при скоростях резания  $V = 0,0011$  м/мин, 0,0048 м/мин, 0,035 м/мин, 0,098 м/мин, 0,280 м/мин и 0,760 м/мин. В нижней части графика расположены два пучка прямых, верхний из которых представ-

ляет зависимость силы  $P_1$  от толщины среза  $a$ , нижний—зависимость силы  $P_2$  от толщины среза. В верхней части графика представлена зависимость усадки стружки от толщины среза и скорости резания. Толщины среза в опытах взяты до 0,25 мм, так как при более значительных толщинах на стружке возникают еле заметные трещинки и закономерности изменения сил резания и усадок стружки получаются искаженными, ибо стружка сливная переходит в стружку скалывания. Каждая точка на графике является средним результатом из 5—10 измерений.

При рассмотрении фиг. 1 прежде всего отметим, что для каждой скорости резания получена своя пара прямых. Все прямые сил  $P_1$  и  $P_2$  не проходят через начало координат, а отсекают на оси некоторый отрезок, представляющий собой силы на задней грани. Если этот отрезок вычесть из сил, измеренных динамометром, то будут получены силы на передней грани, которые, ввиду расположения опытных точек на прямых, будут прямо пропорциональны толщине срезаемого слоя. Таким образом можно констатировать, что при условии постоянства температуры резания, а это условие при работе на микроскоростях точно соблюдается, силы, приложенные к



Фиг. 2

на передней грани инструмента, прямо пропорциональны толщине среза. Далее фиг. 1 показывает, что с увеличением скорости резания при условии постоянства температуры резания и при работе без смазки силы резания увеличиваются. В этих опытах скорость резания изменялась в 700 раз, при этом сила  $P_1$  возросла на 33%, а сила  $P_2$ —на 200% (для некоторой средней толщины стружки). Причина этого возрастания будет разъяснена позже. Силы  $P_1$  и  $P_2$  выражаются точно прямыми линиями. Это указывает на то, что при каждой скорости резания коэффициент трения  $\mu$  будет величиной постоянной и не будет зависеть от толщины среза  $a$ . Верхняя часть графика показывает, что усадка стружки, так же как и силы резания, повышается с увеличением скорости резания. Усадка стружки, начиная с толщины среза  $a = 0,1 \text{ мм}$ , не зависит от толщины среза, при меньших же толщинах она снижается. Это объясняется тем, что при очень тонких стружках на лезвии резца, имеющем некоторое, хотя и очень незначительное округление, образуется при работе без смазки очень маленький наростик, который все же изменяет геометрию резца и уменьшает усадку стружки.

Точно такие же графики нами были получены при работе без смазки с передними углами  $20^\circ$  и  $40^\circ$ . Эти опыты также показали прямолинейное расположение линий сил резания, повышение сил резания с увеличением скорости и независимость усадки стружки  $\zeta$  от толщины среза.

По результатам всех этих многочисленных опытов, проведенных с предельной тщательностью, рассчитаны величины коэффициентов трения. Эти величины коэффициентов трения для различных передних углов представлены в зависимости от скорости резания на фиг. 3. На этой же фигуре представлена усадка стружки.

Фиг. 3 показывает, что коэффициент трения с повышением скорости резания повышается. Точно так же с повышением скорости резания повышается и усадка, за исключением случая с передним углом  $40^\circ$ , где она от скорости не зависит.

Причиной повышения усадки стружки является повышение коэффициента трения. Это станет ясным, если вспомнить уравнение, полученное Зворыкиным

$$\operatorname{tg} \beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\tau}{2} - \frac{\theta}{2},$$

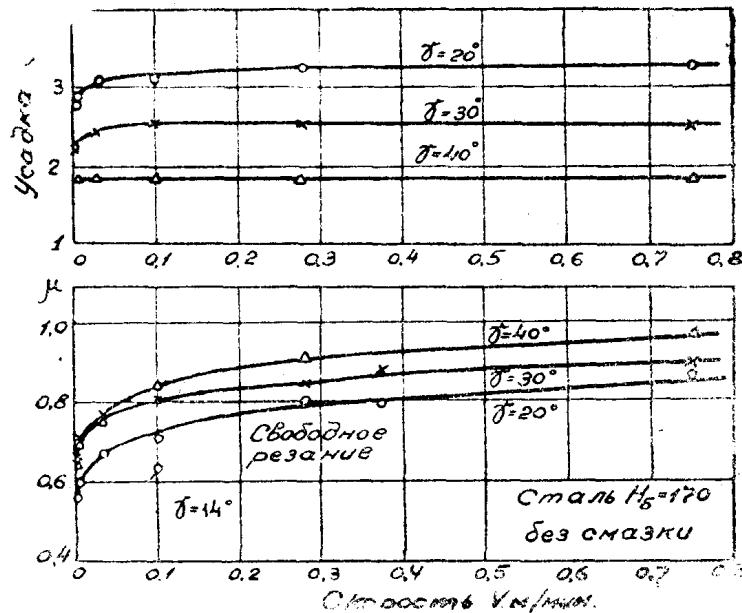
где  $\beta_1$  — угол скалывания,

$\gamma$  — передний угол,

$\tau = (\omega + \gamma)$  — угол трения стружки по резцу.

Вследствие увеличения усадки стружки со скоростью резания увеличивается и сила резания. Здесь получается неувязка для переднего угла  $40^\circ$ , при котором усадка остается постоянной.

Фиг. 3 также показывает, что при резании без смазки значения коэффициентов трения чрезвычайно высоки, причем коэффициент трения повышается с увеличением переднего угла резца. Высокие значения коэффи



Фиг. 3

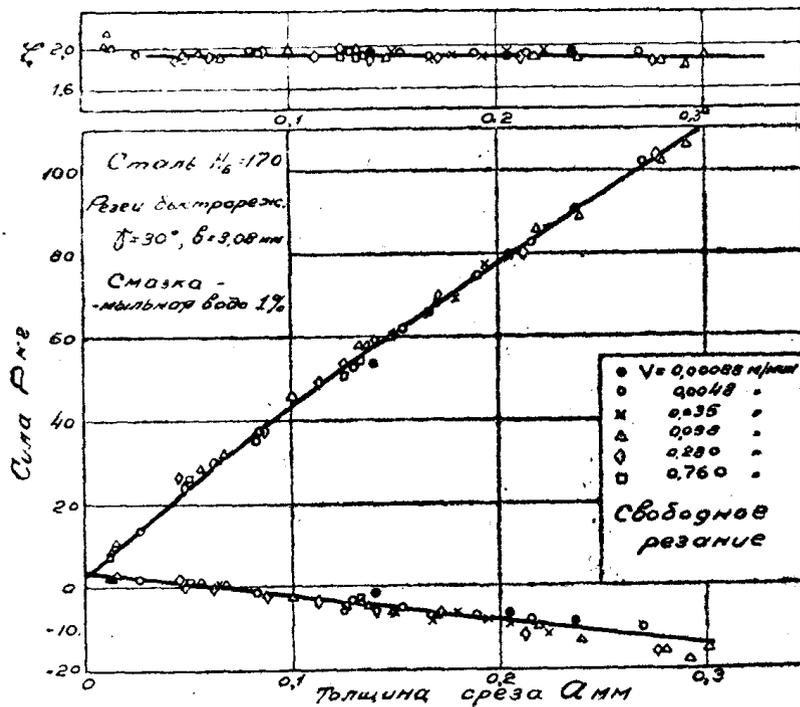
ента трения при резании сталей имеют место ввиду того, что здесь мы имеем дело фактически с сухим трением.

Необходимо было выяснить, каковы же основные причины повышения коэффициента трения и сил резания с увеличением скорости резания. Эгих причин могло быть две: повышение скорости деформации с увеличением скорости резания могло вызвать повышение напряжений в деформируемом металле, или уменьшение времени контакта между стружкой и передней гранью резца с увеличением скорости резания могло снизить смазочный эффект, вызываемый частицами воздуха и содержащихся в нем паров, проникающих на поверхности трения стружки и резца. Первая причина,

вообще говоря, была мало вероятна, так как влияние скорости деформации на напряжения в стали при комнатных температурах мало существенно, ввиду высокой температуры плавления стали, повышения же сил резания, полученные нами, были достаточно значительными.

Решение этого вопроса было нами выполнено путем применения смазки при резании. Нами были испробованы различные смазки: растительное масло, минеральное масло, 1% раствор мыла в воде. Наилучшие результаты в смысле решения поставленного вопроса дала смазка мыльным раствором, при применении которого совершенно исчезло влияние скорости на силы резания, коэффициент трения и усадку стружки.

На фиг. 4 приведены результаты опытов, проведенных с резцом, имеющим передний угол  $\gamma = 30^\circ$ . Такие же графики были получены для пе-



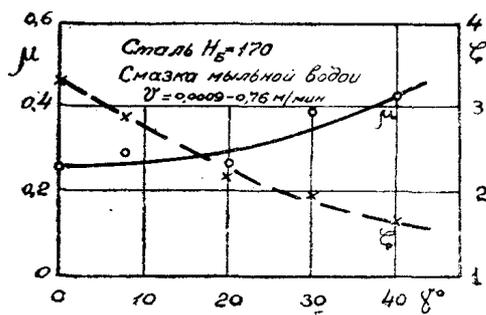
Фиг. 4

редних углов  $1,8$ ,  $20$  и  $40^\circ$ . Все они дают то же самое, что представлено на фиг. 4.

Фиг. 4 показывает, что силы резания и усадка стружки при изменении скорости резания (а значит и скорости деформации) более чем в 800 раз не изменяются в сколько нибудь заметных пределах. Точки всех многочисленных опытов, проведенных с различными скоростями, хорошо расположились на одних и тех же линиях. Коэффициент трения здесь также получается не зависящим от скорости резания. Таким образом, можно считать доказанным, что скорость резания через скорость деформации не влияет при резании стали на силы резания, напряжения и коэффициент трения. Отсюда можно заключить, что при резании без смазки коэффициент трения повышается с увеличением скорости резания, ввиду уменьшения эффекта проникновения воздуха на трущиеся поверхности.

На фиг. 5 представлено изменение коэффициента трения и усадки при изменении переднего угла с применением смазки мыльным раствором. Фиг. 5 прежде всего показывает, что коэффициент трения с применением смазки чрезвычайно сильно снижается. Величина его уменьшается при применении смазки примерно в  $2\frac{1}{2}$ —3 раза. Фиг. 5, кроме этого, показы-

вает, что коэффициент трения увеличивается с увеличением переднего угла так же, как это наблюдалось при резании без смазки (фиг. 3). Причины влияния переднего угла на коэффициент трения были изучены нами в другой работе (см. А. М. Розенберг и Ю. П. Зимин. Некоторые вопросы



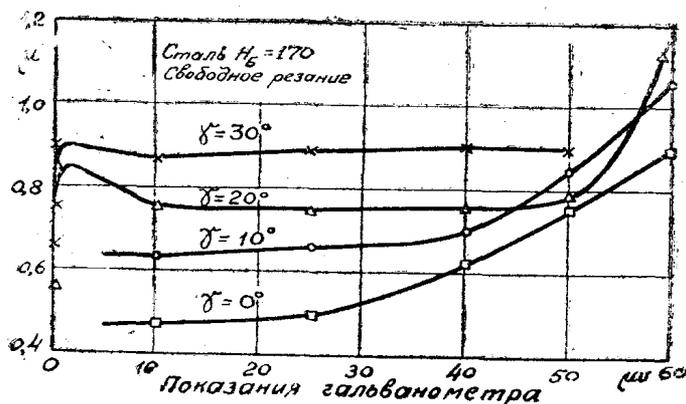
Фиг. 5

трения при резании металлов). Эта работа выяснила, что коэффициент трения на передней грани резца зависит при условии сохранения постоянной температуры от удельного давления на трущихся поверхностях, повышаясь с понижением удельного давления. При увеличении переднего угла, как показали опыты, удельное давление уменьшается. Это и приводит к повышению коэффициента трения при увеличении переднего угла резца.

### Опыты по резанию стали на средних скоростях резания

Эта серия опытов была проведена методом свободного резания быстрорежущими резцами на скоростях резания от 1,5 до 70 м/мин. Ширина стружки во всех этих опытах была взята 3 мм, толщина среза 0,214 мм. Резцы имели передние углы: 0, 10, 20, 30°. Опыты имели целью выяснить влияние температуры резания на коэффициент трения и усадку стружки при работе быстрорежущими резцами с различными передними углами. Температура резания в опытах измерялась методом естественной термопары. Быстрорежущие резцы были взяты с целью возможности сравнения полученных данных с результатами опытов, проведенных на микроскоростях, которые также были проведены быстрорежущими резцами. Коэффициенты трения вычислялись без учета сил на задней грани резца, так как при взятой толщине среза эти силы по величине были мало заметны.

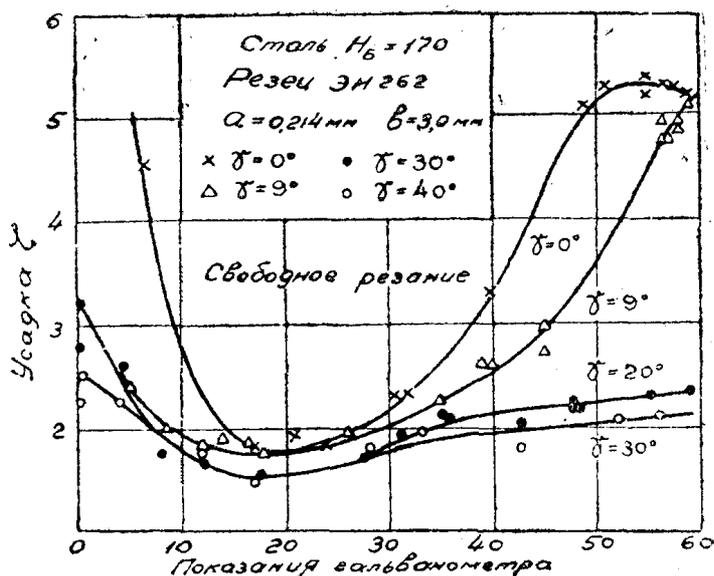
На фиг. 6 приведены результаты полученных коэффициентов трения. По оси абсцисс здесь отложены показания гальванометра, измеряющего температуру резания. На оси ординат здесь нанесены точки, соответствующие коэффициентам трения, полученным при опытах на микроскоростях резания для передних углов 20° и 30°. Фиг. 6 показывает, что при средних скоростях резания мы наблюдаем так же, как и при микроскоростях, что коэффициент трения тем выше, чем больше передний угол резца. С повышением температуры резания, т. е. с повышением скорости резания коэффициент трения возрастает. При переходе от микроскоростей на средние скорости коэффициент трения немного уменьшается. Причины, вызывающие повышение коэффициента трения с повышением температуры резания, до сих пор не выяснены. Их тем более трудно выяснить, что в пределах средних скоростей резания, при которых нами были проведены опыты, на резце



Фиг. 6

имеет место образование нароста, который сильно искажает геометрию резца. Следует отметить, что вычисляя коэффициент трения, мы считали силу трения расположенной на передней грани резца, что, вообще говоря, не совсем правильно, так как стружка сходит по передней грани нароста. Относить же силу трения к передней грани нароста не представляется возможным, так как нарост не представляет собой стабильное тело с точно определенной геометрией. Он много раз в секунду исчезает и появляется вновь на передней грани резца и в разные моменты времени имеет разную величину или отсутствует совсем. Кроме того, стружка при наличии нароста осуществляет трение не только по наросту, но и за наростом по передней грани резца.

На фиг. 7 представлены для различных передних углов резца зависимости усадки стружки от температуры резания. Сопоставляя эти фигуры с фиг. 6, можно заметить согласованное изменение усадки стружки и коэффициентов трения, особенно в области малых скоростей резания при переходе от микроскоростей, а также в области самых больших скоростей, где нарост уже исчезает. Здесь параллельно с повышением коэффициента трения увеличивается и усадка стружки. Это хорошо подтверждает положение Зворыкина, что усадка стружки определяется направлением равнодействующей силы на передней грани резца, которое в свою очередь зависит от коэффициента трения стружки по резцу.



Фиг. 7

Все опыты этой серии были проведены по той же стали, с которой проводились опыты на микроскоростях.

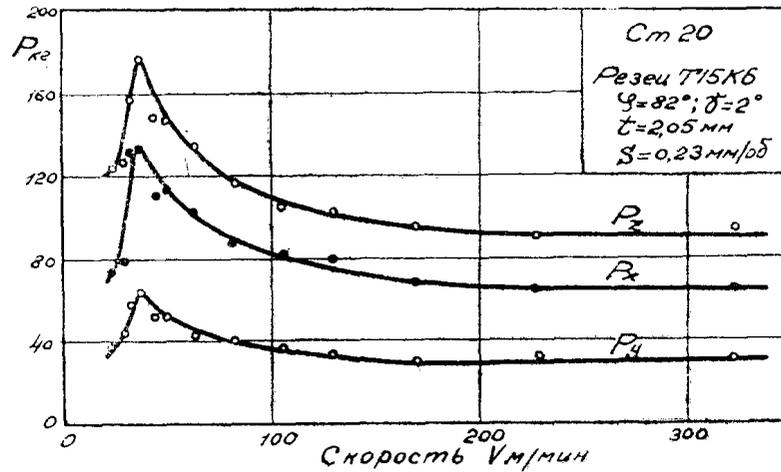
#### Опыты по резанию стали на высоких скоростях резания

Эта серия опытов была проведена с целью выяснения влияния дальнейшего повышения температуры резания на коэффициент трения. Здесь также выяснилось влияние на коэффициент трения марки режущего сплава. Опыты были проведены при скоростях резания от 20 до 450 м/мин по стали 20 методом несвободного резания при глубине резания 2 мм и подаче 0,23 мм/об. Опыты проводились методом несвободного резания, так как иначе потребовалось бы очень большое количество металла, которого не было в нашем распоряжении. Резание проводилось резцами с пластинками твердых сплавов ВК8 и Т15К6. Передние углы у резцов были взяты  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+15^\circ$ ,  $+30^\circ$ .

На фиг. 8, 9, 10, 11 показаны результаты опытов с резцами Т15К6. Здесь представлены зависимости сил резания, усадки стружки и коэффициента трения от скорости резания. По существу это зависимости от температуры резания. Мы в этих и последующих графиках откладывали на оси абсцисс скорость резания, а не показания гальванометра, так как

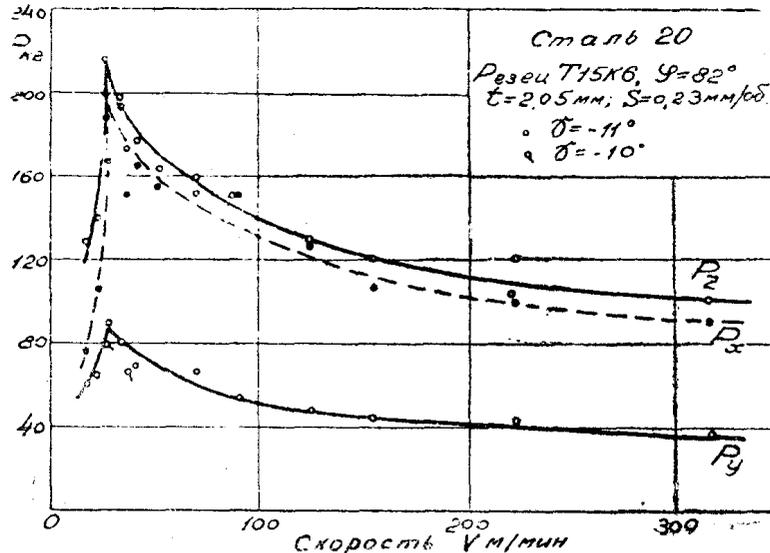
показания гальванометра, полученные при работе различных режущих сплавов, несравнимы между собой.

Фиг. 8, 9, 10, 11 показывают, что при увеличении скорости резания (температуры резания) все, представленные нами величины (силы резания, коэффициент трения, усадка стружки) вначале увеличиваются, переходят через максимум и далее при дальнейшем повышении скорости резания и



Фиг. 8

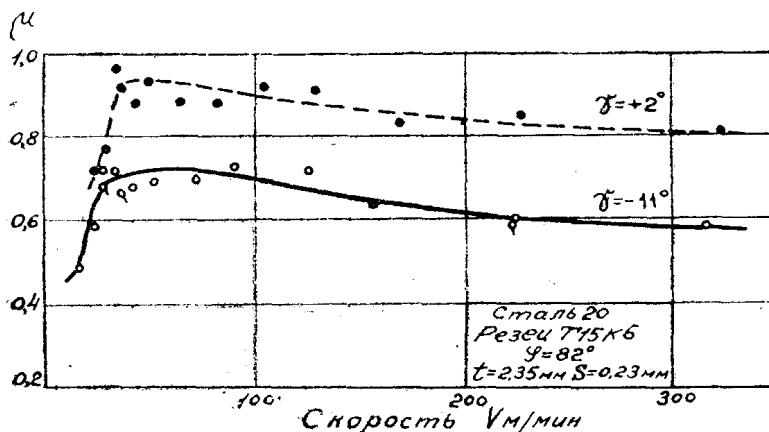
температуры уменьшаются, сначала быстро, а затем все медленнее и медленнее, стремясь к некоторой ассимптоте. Усадка стружки и силы резания при всех скоростях резания для большого угла резания имеют более высокие значения, коэффициент трения, наоборот, выше для большего



Фиг. 9

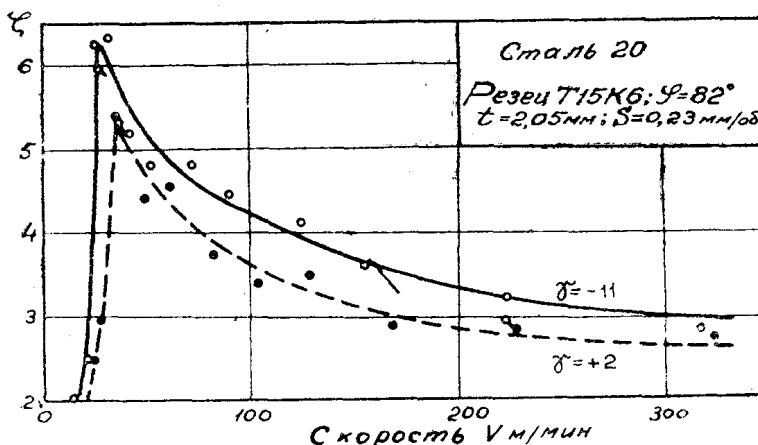
переднего угла, так же как это мы наблюдали вплоть до самых малых скоростей резания. Зоны скоростей резания, в которых коэффициент трения возрастает, характерны возрастанием усадки стружки и сил резания, и наоборот, там, где коэффициент трения понижается, наблюдается одновременное понижение усадки стружки и сил резания. Максимальные значения коэффициента трения, усадки стружки и сил резания при большем угле резания соответствуют меньшим скоростям. Совершенно идентичное

протекание кривых коэффициента трения, усадки стружки и сил резания убедительно показывает на взаимную связь между этими величинами.



Фиг. 10

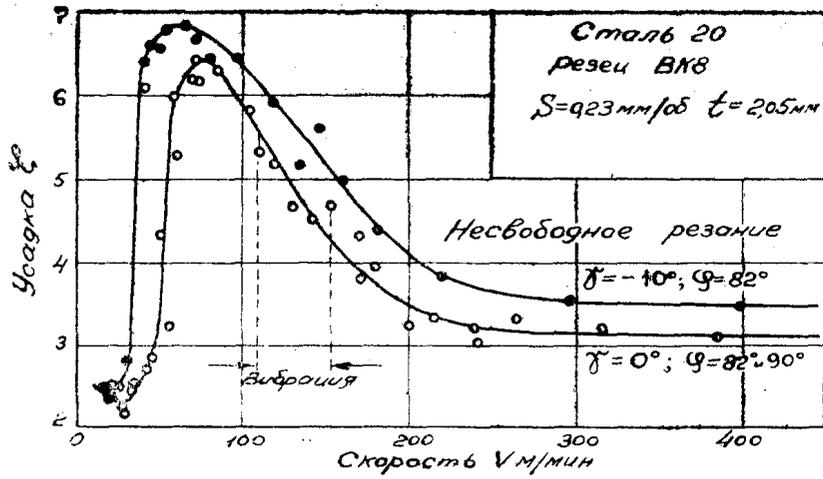
Таким образом, влияние коэффициента трения на усадку стружки и силы резания здесь совершенно отчетливо проявляется.



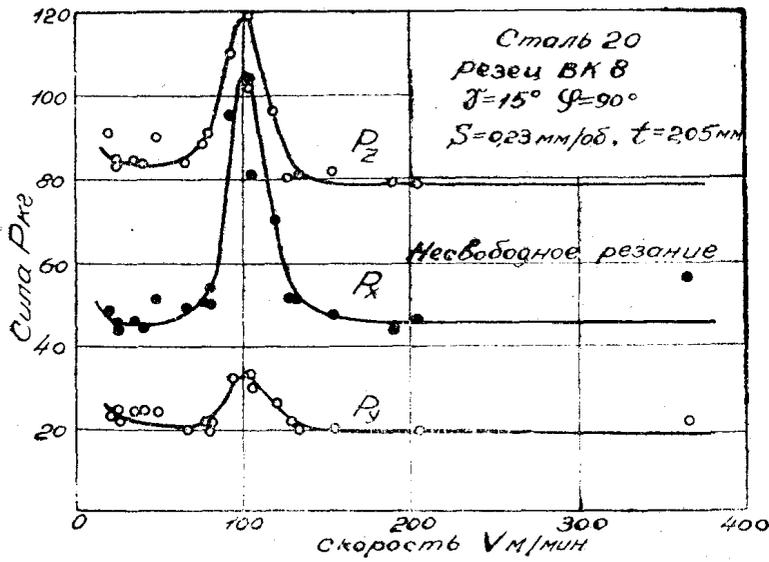
Фиг. 11

На фиг. 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 нами представлены результаты опытов с резцами, оснащенными пластинками ВК8. Из этих графиков мы можем сделать те же выводы, что нами только что сделаны по опытам с резцами Т15К6. При сравнении графиков, построенных для резцов с пластинками ВК8, с графиками для резцов с пластинками Т15К6 можно констатировать, что все характерные точки для резцов с пластинками ВК8 находятся для одних и тех же углов резания в области более высоких скоростей резания. Причиной этого, по нашему мнению, является более высокая теплопроводность сплава ВК8. Сплав ВК8 имеет теплопроводность  $0,141 \text{ кал/см сек. г}$ , в то время как у сплава Т15К6 теплопроводность лишь  $0,065 \text{ кал/см сек. г}$ . Благодаря этому при одних и тех же скоростях резания температура на передней грани резца с сплавом ВК8 ниже, чем на передней грани резца со сплавом Т15К6, и та характерная температура, при которой коэффициент трения, усадка стружки и силы резания достигают своих наибольших значений, будет достигнута при работе сплавом ВК8 при более высоких скоростях резания. Мы предполагаем, что при одних и тех же углах резания температуры, при кото-

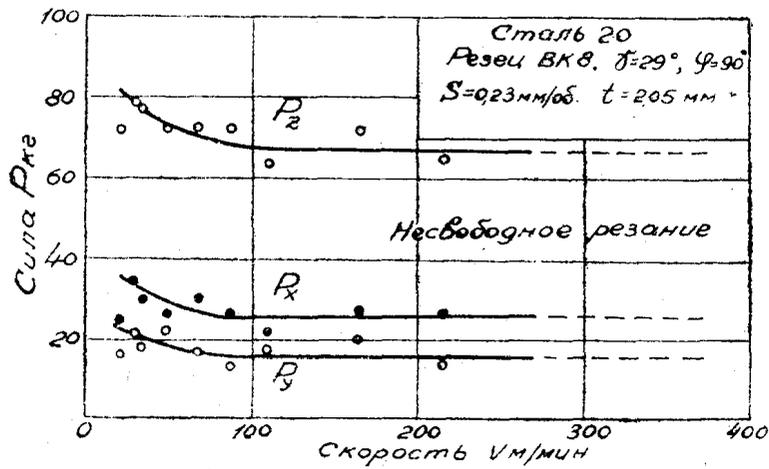




Фиг. 15



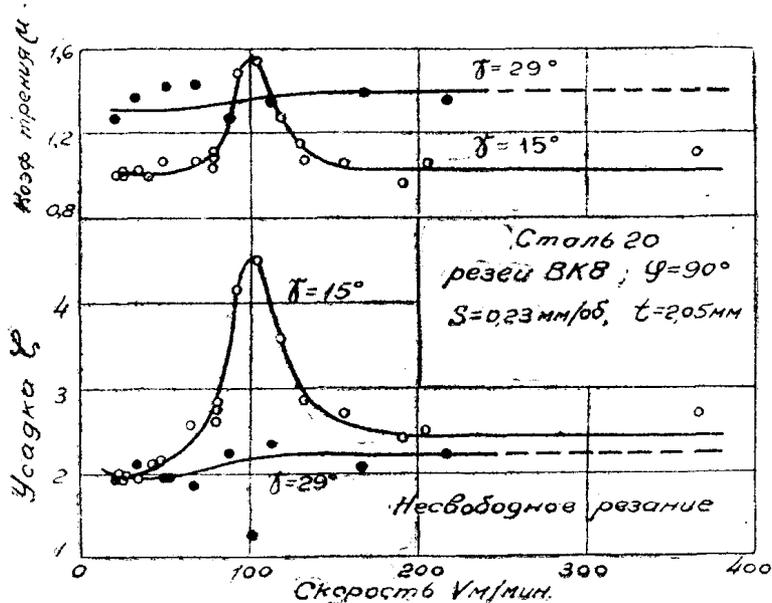
Фиг. 16



Фиг. 17

рых коэффициент трения достигает своего наибольшего значения на сплавах ВК8 и Т15К6, одни и те же, несмотря на большую разницу в скоростях резания. Этого предположения мы не имели возможности проверить, так как для проверки нужно было бы проградуировать естественные термомпары. Для этого нужно было иметь длинные стержни из твердых сплавов ВК8 и Т15К6, которых в нашем распоряжении не было.

Сравнение графиков, построенных для сплавов ВК8 и Т15К6, кроме того, показывает, что абсолютные значения коэффициентов трения на сплаве ВК8 выше, чем на сплаве Т15К6. Это сравнение, конечно, нужно проводить только для одинаковых углов резания. При сравнении выявляется также, что и усадки стружки выше для сплава ВК8. Это обстоятельство дополнительно подтверждает несомненное влияние коэффициента трения на усадку стружки. Сравнение сил резания показывает, что в области



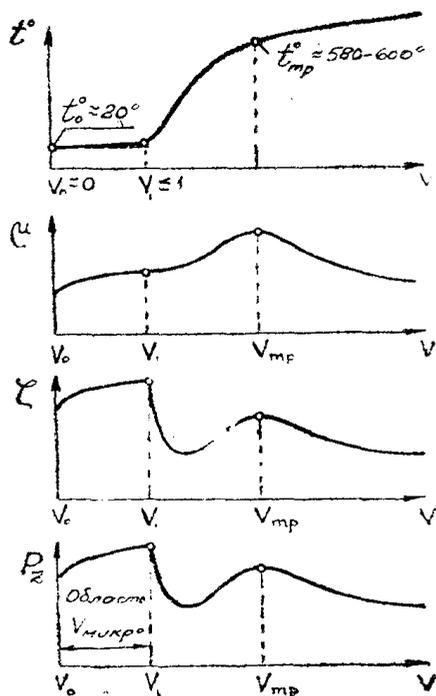
Фиг. 18

высоких скоростей резания, на спадающих ветвях кривых, силы резания для сплава ВК8 также существенно выше, чем для сплава Т15К6. Максимальные же значения сил будут выше, наоборот, для сплава Т15К6, несмотря на более низкие значения усадки стружки и коэффициента трения для этого сплава. Это, по нашему мнению, объясняется тем обстоятельством, что эти максимальные значения сил для сплава Т15К6 находятся в области значительно более низких скоростей резания, чем для сплава ВК8. При этих более низких скоростях резания температура на плоскости сдвига стружки, т. е. в области деформации стружки, более низка ввиду более значительных возможностей теплоотвода. При более низких температурах металл имеет более высокие свойства прочности, что и связано с более высокими значениями сил резания.

Эти же графики показывают, что величины сил резания зависят от материала режущего инструмента, в то время как всегда считалось, что материал режущего инструмента не оказывает влияния на силы резания. Мы видим, что сплавы ВК8 и Т15К6 дают при одних и тех же скоростях резания различные коэффициенты трения, что, в свою очередь, вызывает различную усадку стружки и силы резания. Сравнение графиков показывает, что при работе сплавом ВК8 в области скоростного резания силы резания оказываются заметно выше, чем при работе сплавом Т15К6. Особенно велика разница между силами  $P_x$ . Возможно, что именно благодаря

этому наблюдается, что при работе сплавом ВК8 происходит более интенсивный износ инструмента по передней грани, чем при работе сплавом Т15К6.

На основании описанных выше опытов, проведенных в чрезвычайно широких пределах изменения скорости резания (от 0,001 до 450 м/мин), можно дать общую принципиальную схему изменения коэффициента трения, усадки стружки и сил резания во всем широком диапазоне изменения скоростей резания. Эта схема представлена на фиг. 19. В области микроскоростей коэффициент трения, усадка стружки, силы резания повышаются с повышением скорости резания. Далее при переходе скорости резания за значения в 1—2 м/мин, наряду с дальнейшим повышением коэффициента трения, усадка стружки и силы резания начинают уменьшаться, переходят через минимум и затем опять начинают возрастать. Это связано с появлением, развитием нароста на резце, уменьшающего угол резания, а поэтому и вызывающего уменьшение усадки и сил резания. С повышением скорости резания передний угол на наросте сперва растет, достигает максимума, а далее начинает уменьшаться. Это уменьшение переднего угла на наросте вызывает повышение усадки стружки и сил резания. При дальнейшем повышении скорости резания нарост исчезает, угол резания достигает своего наибольшего значения, усадка стружки и силы резания также приближаются к своим максимальным значениям. Наибольших своих значений они достигают в тот момент, когда коэффициент трения станет наибольшим и дальше при уменьшении коэффициента трения силы резания и усадка стружки уменьшаются при дальнейшем повышении скорости резания.

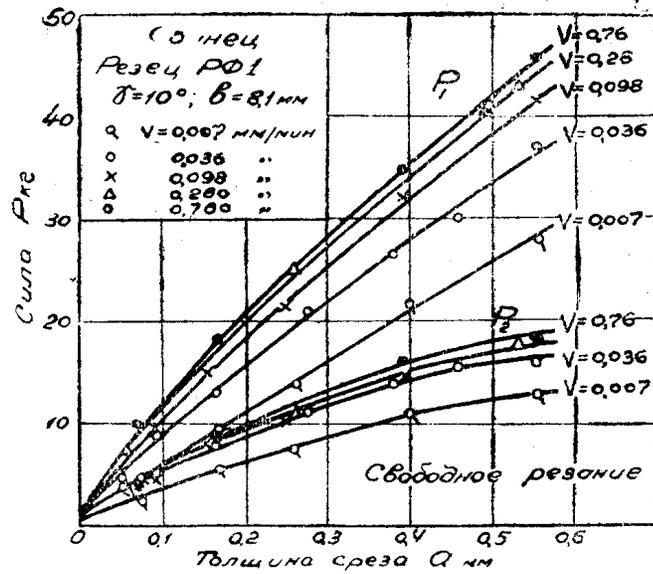


Фиг. 19

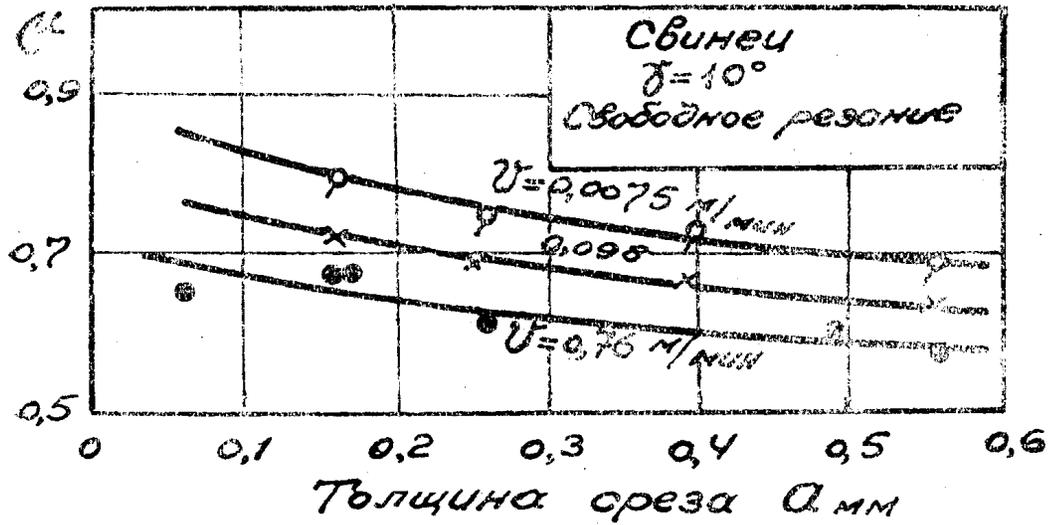
### Опыты по резанию свинца

Опыты со свинцом были проведены как на микроскоростях резания, так и на высоких скоростях. На микроскоростях скорости изменялись от 0,001 м/мин до 0,760 м/мин. Передний угол изменялся от 10 до 60° (здесь мы воспользовались частью опытов проф. Розенберга и кандидата технических наук Ю. П. Зимина в дополнение к тем, которые были проведены нами).

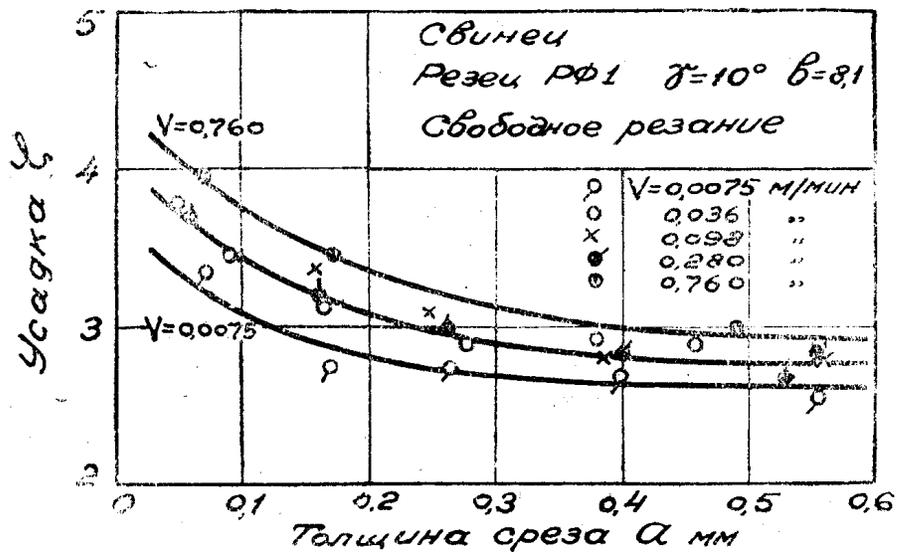
На фиг. 20 приведены зависимости сил резания от толщины стружки и скорости резания. Как показывает график, силы резания очень сильно растут с ростом скорости резания. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при резании свинца на микроскоростях линии сил резания не являются точно прямыми, а несколько изогнутыми. Если по этим опытам рассчитать коэффициенты трения, то мы получим график, представленный на фиг. 21. Этот график показывает, что коэффициенты трения зависят от толщины среза, уменьшаясь с увеличением ее. На фиг. 22 представлено изменение усадки стружки. Из сравнения графиков можно видеть, что с увеличением толщины среза коэффициент трения уменьшается, это вызывает уменьшение усадки стружки, что в свою очередь уменьшает удельную работу и дает искривленную линию силы резания.



Фиг. 20

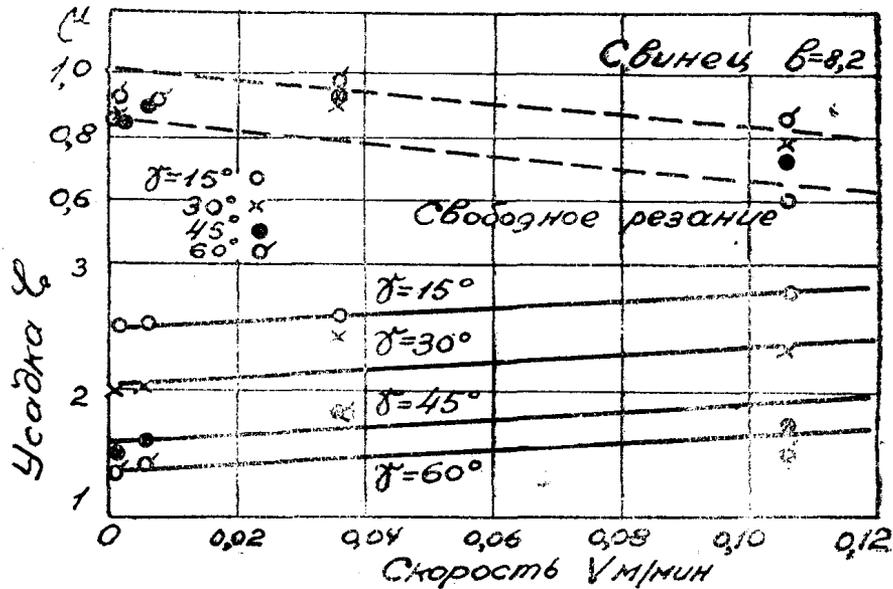


Фиг. 21



Фиг. 22

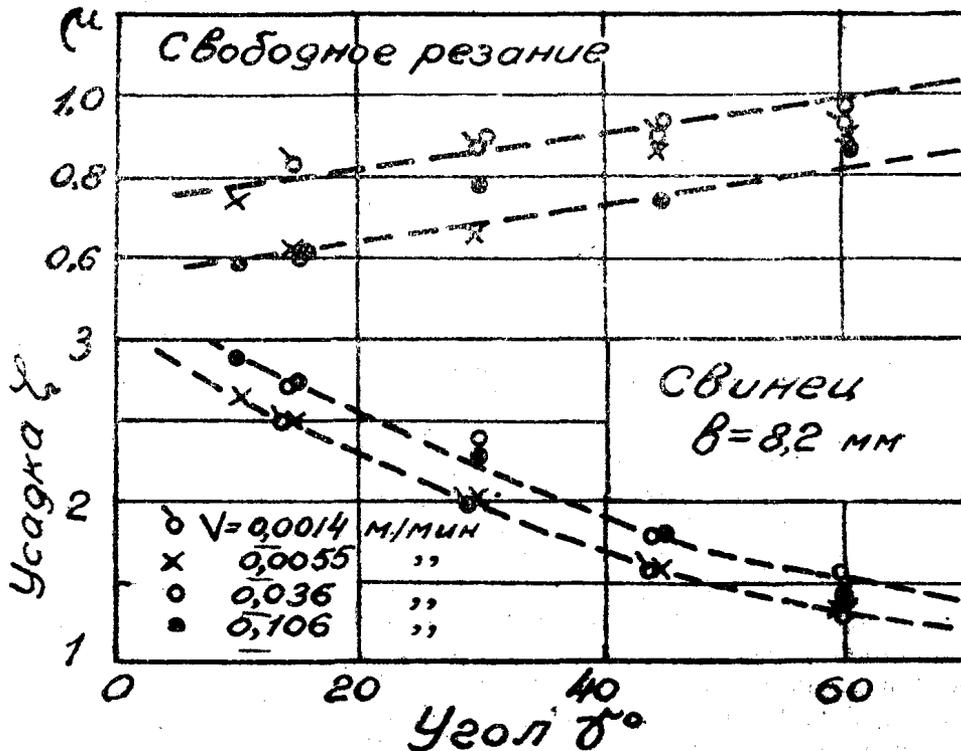
Следует отметить, что на микроскоростях влияние скорости резания на коэффициент трения и усадку стружки оказывается противоположным. В то время как коэффициент трения уменьшается с повышением скорости резания, усадка стружки растет. Это противоречие мы объяснить пока не умеем. Зависимость коэффициента трения и усадки стружки от скорости резания представлена на фиг. 23 для разных передних углов. Мы видим,



Фиг. 23

что указанное выше явление наблюдается для широкого диапазона передних углов от 10 до 60°.

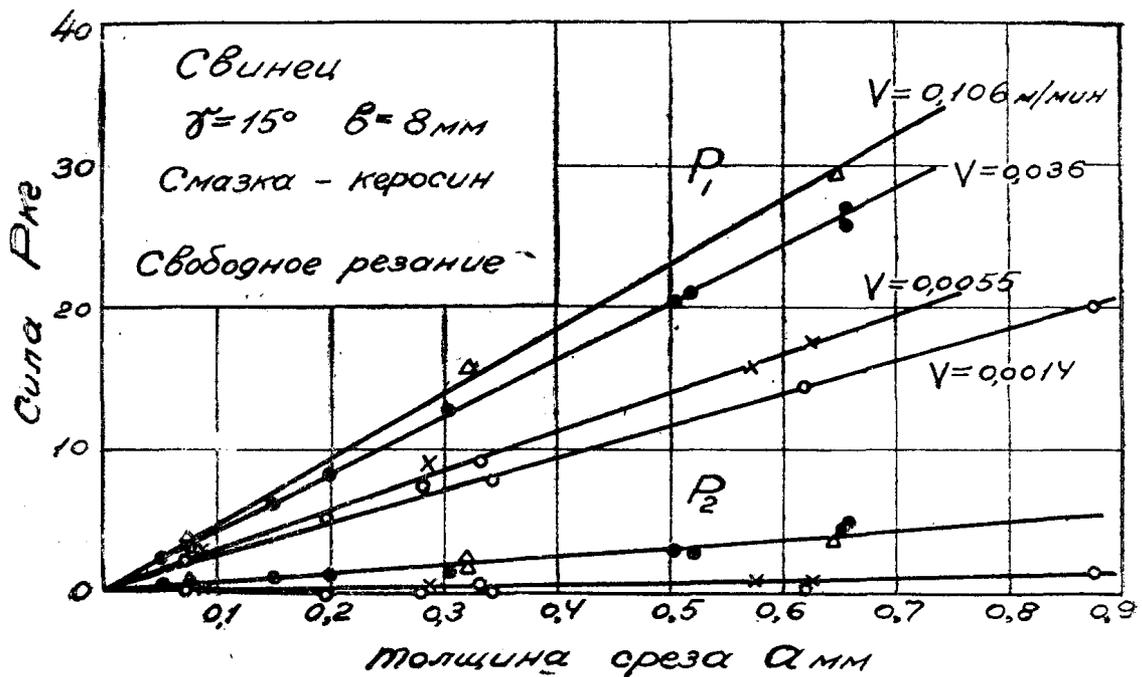
На фиг. 24 показано изменение коэффициента трения и усадки стружки с изменением переднего угла. С увеличением переднего угла коэффициент



Фиг. 24

трения заметно возрастает. Это явление наблюдалось нами на всех без исключения металлах, которые были применены в наших опытах. При расчете коэффициентов трения и усадок стружки для построения фиг. 24 мы брали толщину среза 0,4—0,5 мм.

При применении смазки силы резания при резании свинца очень сильно падают. На фиг. 25 показаны силы резания при смазке керосином. График показывает, что влияние скорости резания при применении смазки стало менее значительным, но не исчезло совсем, как это мы имели при резании стали со смазкой. Это объясняется тем обстоятельством, что свинец является очень легкоплавким металлом; а поэтому он очень чувствителен к скорости деформации. При увеличении скорости резания скорость деформации возрастает и растут те напряжения, которые сопутствуют пластической деформации. Поэтому и силы резания возрастают с повыше-



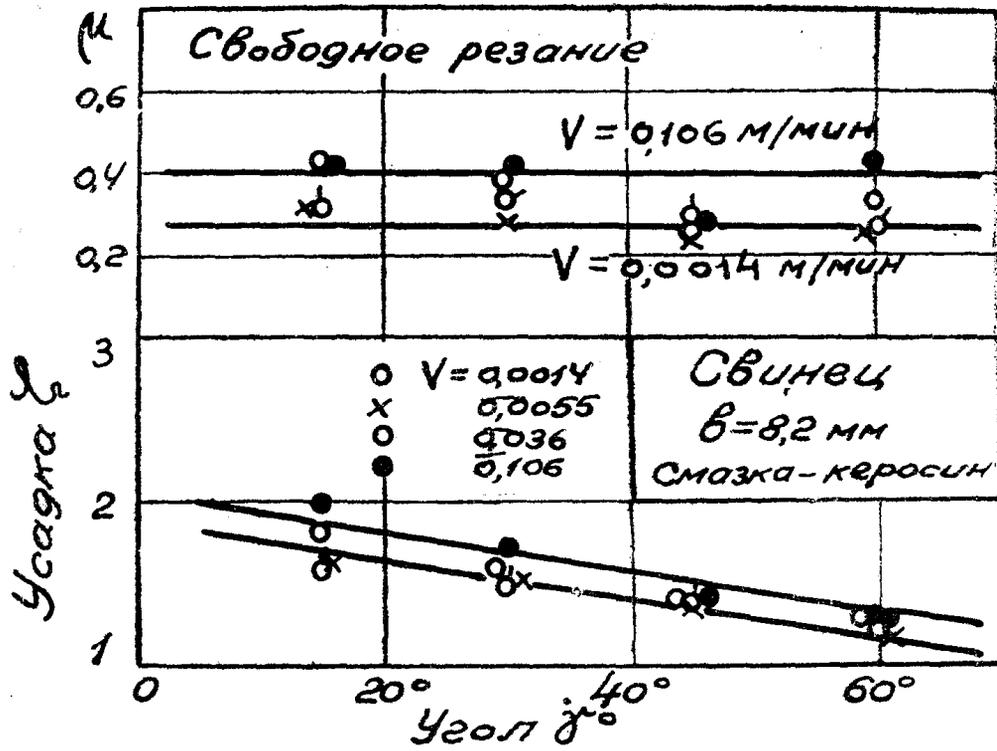
Фиг. 25

нием скорости резания. Фиг. 25 показывает, что силы резания при применении смазки выражаются прямыми линиями, усадка стружки и коэффициент трения не зависят от толщины стружки.

На фиг. 26 представлено влияние переднего угла на коэффициент трения и усадку стружки при резании со смазкой. Коэффициент трения здесь уже не зависит от переднего угла, но увеличивается с повышением скорости резания. Здесь уже мы не наблюдаем отмеченного выше различного влияния скорости резания на коэффициент трения и усадку стружки. Обе эти величины повышаются с повышением скорости резания, и такое соответствие между их изменением является вполне логичным.

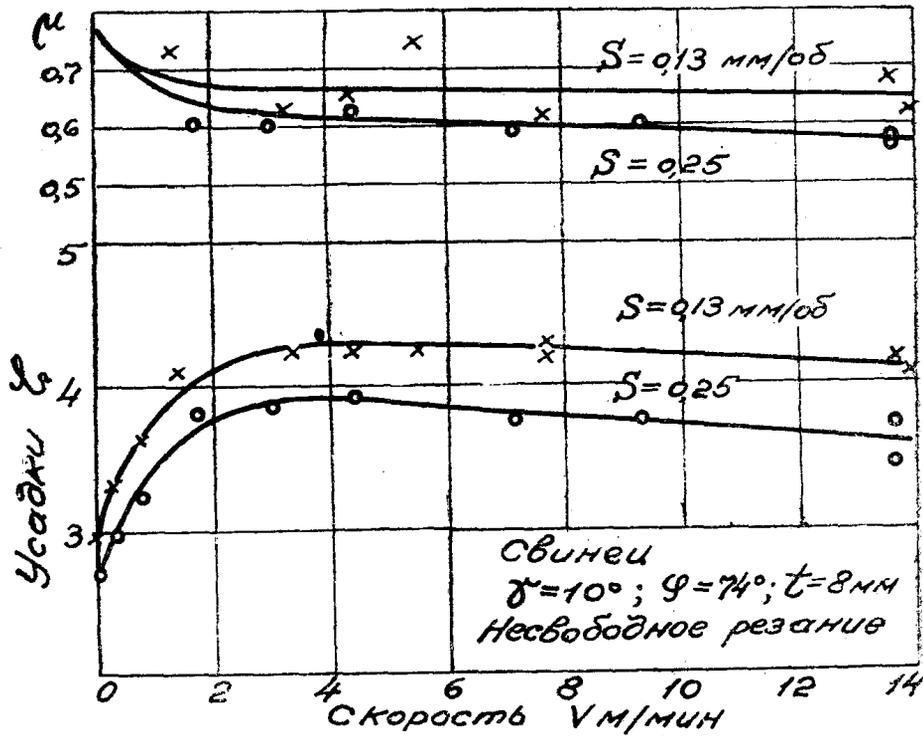
На фиг. 27 показано изменение коэффициента трения и усадки стружки в области средних скоростей скорости резания, а на фиг. 28 до очень высоких скоростей резания. Эти опыты нами проводились методом несвободного резания. Как мы видим, коэффициент трения все время и непрерывно уменьшается с повышением скорости резания, оставаясь более высоким для более тонкой стружки. Усадка стружки при скорости резания в 3 м/мин переходит через максимальное значение, а затем непрерывно уменьшается, следуя за изменением коэффициента трения. Усадка также имеет более высокое значение для более тонкой стружки. Таким образом,

в области высоких скоростей резания наблюдается логическое соответствие между изменением коэффициента трения и усадки стружки.



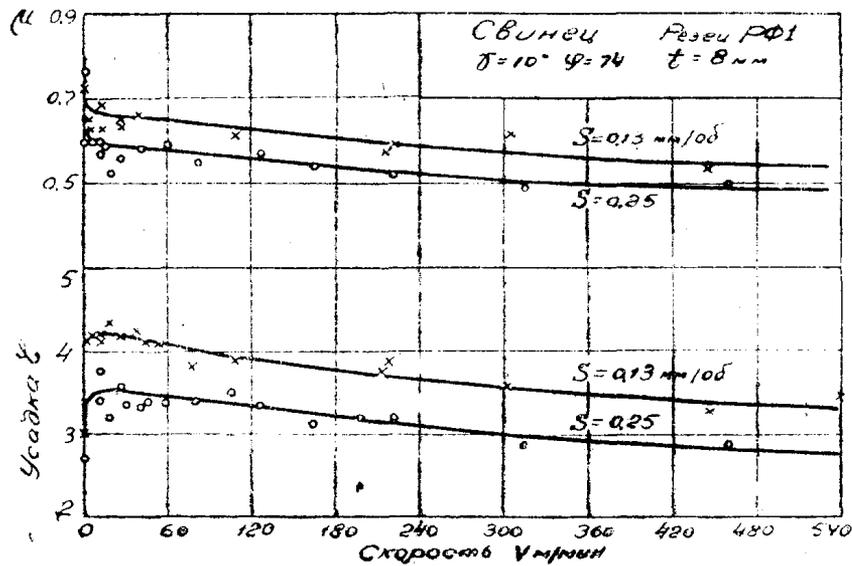
Фиг. 26

Для того чтобы высказать предположения о причинах изменения коэффициентов трения и усадки стружки в области высоких скоростей ре-



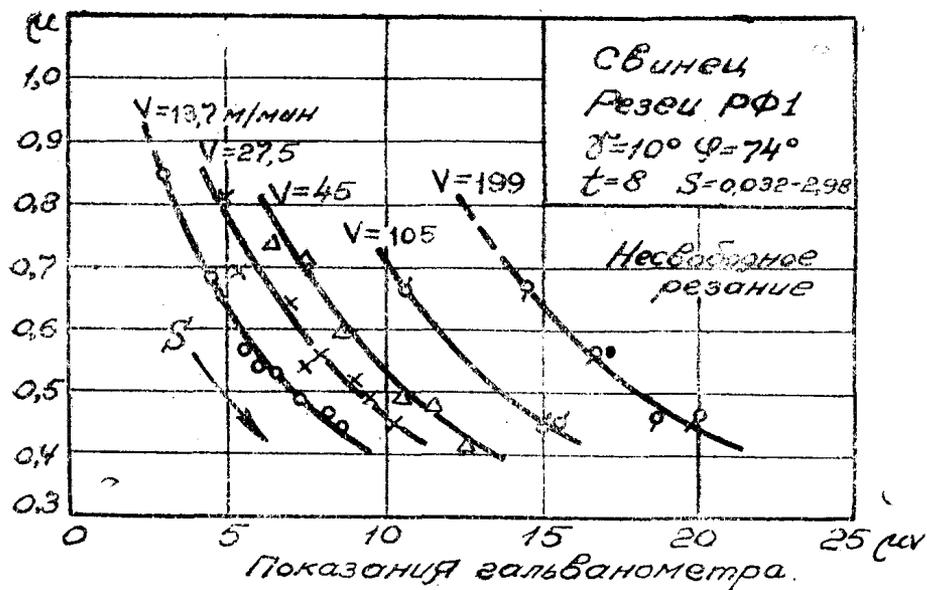
Фиг. 27

зания, нами при опытах измерялась температура резания методом естественной термопары. На фиг. 29 и 30 представлено изменение коэффициента трения и усадки стружки при различных скоростях резания в зависимости от показаний гальванометра. Эти графики показывают, что при неизменной скорости резания, а значит и при постоянной скорости деформации,



Фиг. 28

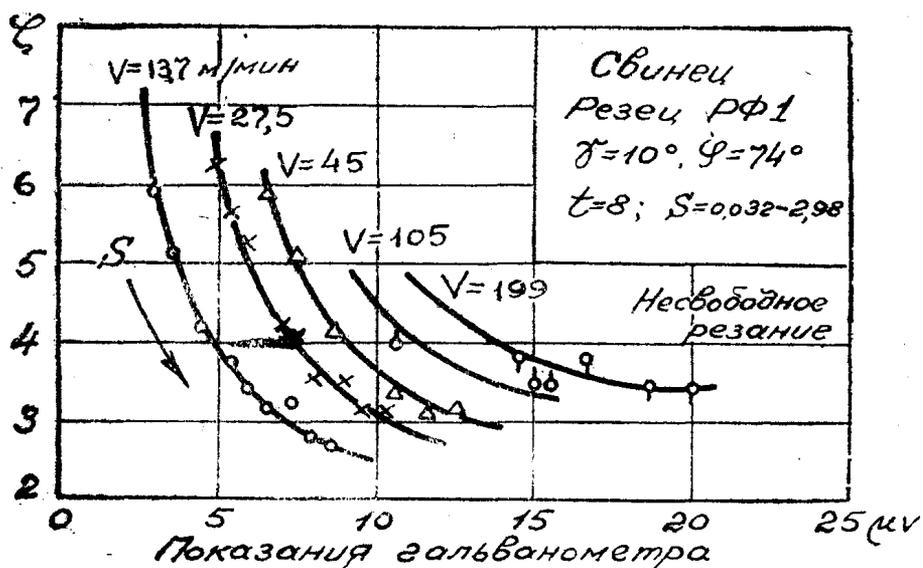
коэффициент трения и усадка стружки тем меньше, чем выше температура на передней грани резца. Наоборот, при постоянной температуре эти обе величины повышаются с повышением скорости резания, т. е. скорости



Фиг. 29

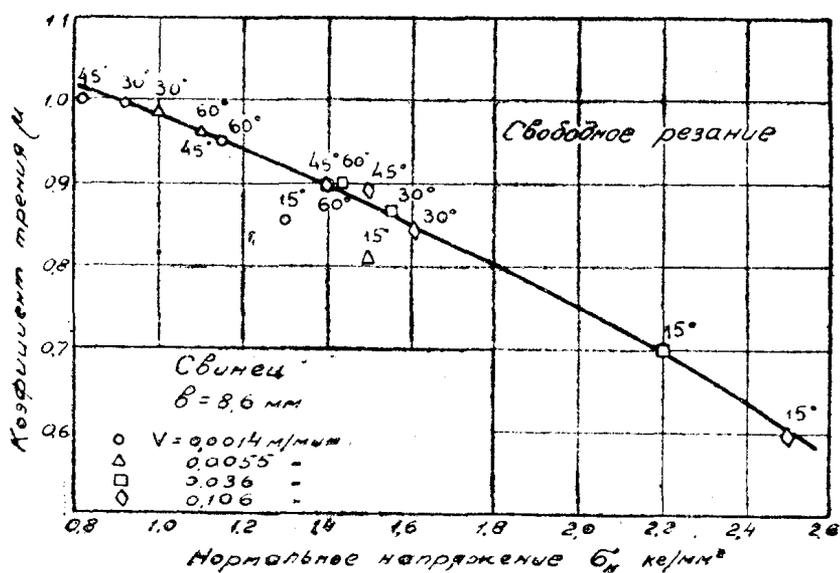
деформации. Таким образом, можно предположить, что во всех приведенных графиках на коэффициент трения и на усадку стружки влияют два фактора—температура, при повышении которой они уменьшаются, и скорость деформации, при повышении которой они увеличиваются.

При микроскоростях мы наблюдали, что скорость резания также влияет на коэффициент трения, причем здесь коэффициент трения уменьшался с повышением скорости резания. Было бы неверно предположить, что это является результатом повышения температуры, так как при микроскоростях можно считать температуру постоянной. Известно, что при



Фиг. 30

сухом трении коэффициент трения обнаруживает зависимость от удельного давления на поверхностях трения, уменьшаясь с увеличением удельного давления. Удельное давление между стружкой и передней гранью реза можно рассчитать, если знать площадь соприкосновения между струж-



Фиг. 31

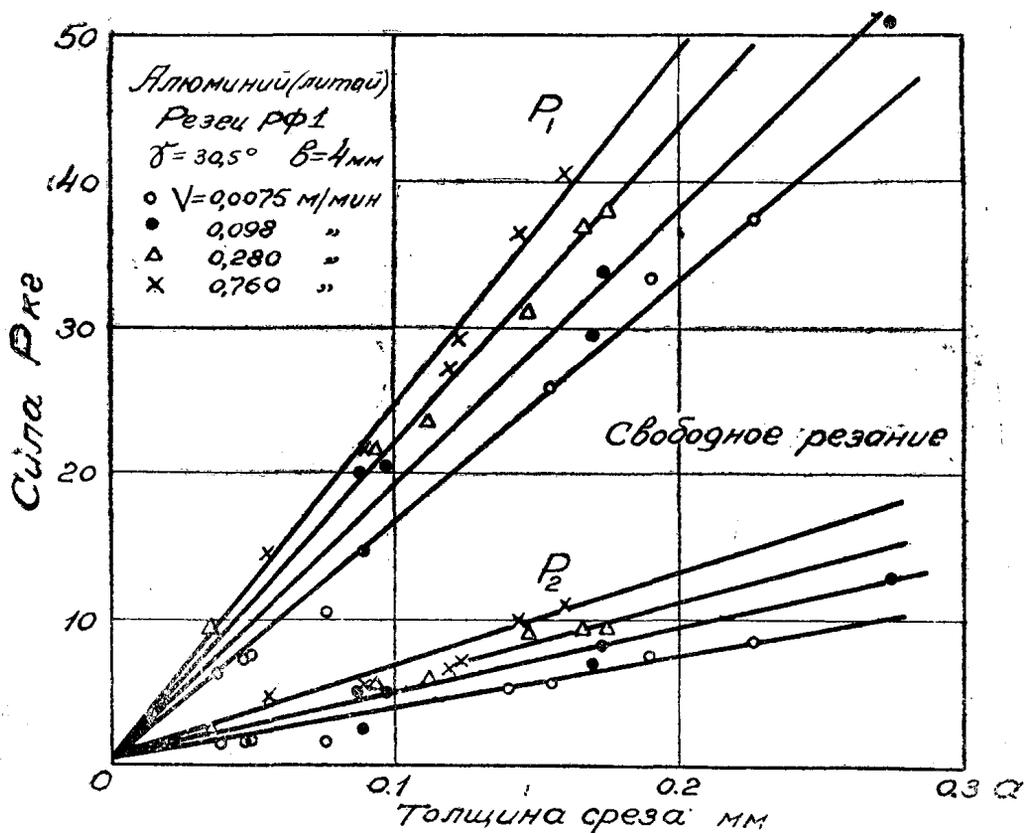
кой и передней гранью реза. Эту площадь можно достаточно точно сместить по следу, который оставляет стружка на передней грани. Сопоставление коэффициента трения с удельным давлением представлено на фиг. 31. На этой фигуре нанесены значения коэффициентов трения для различных микроскоростей и различных передних углов. По оси абсцисс нанесены

удельные давления между стружкой и передней гранью резца в  $\text{кг/мм}^2$ , которые на фигуре названы нормальными напряжениями. Конечно, нужно представлять себе, что здесь нанесены лишь средние значения удельных давлений, полученные делением нормальной силы на площадь соприкосновения стружки и передней грани резца. В действительности удельное давление на передней грани резца не является по всей площади трения постоянным. График показывает, что эти средние удельные давления изменяются при изменении условий резания в чрезвычайно широких пределах от 0,8 до 2,5  $\text{кг/мм}^2$ . Все опыты с широким диапазоном изменения передних углов и скоростей резания вполне удовлетворительно уложились на одну кривую, показывающую, что с увеличением удельного давления коэффициент трения понижается. Таким образом, есть основания предполагать, что изменение коэффициента трения с изменением скорости резания и переднего угла в условиях резания при микроскоростях, когда температура резания остается постоянной, есть результат изменения удельных давлений на поверхности трения между стружкой и резцом. Из этой же фигуры можно видеть, что при одних и тех же передних углах для более высоких скоростей резания были получены более высокие удельные давления. Это повидимому объясняется тем, что при повышении скорости резания, т. е. скорости деформации, металл приобретает более высокие свойства прочности и может при соприкосновении стружки с передней гранью резца выдержать более высокие напряжения смятия.

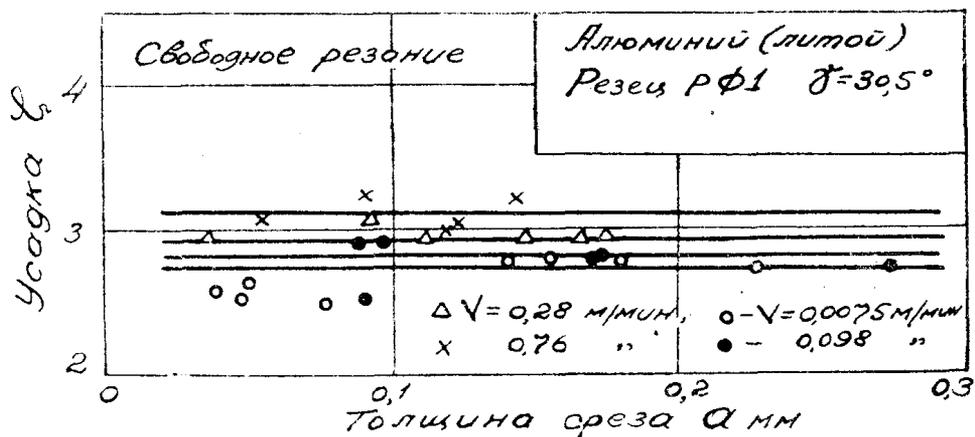
### Опыты по резанию алюминия

Опыты по резанию алюминия были проведены как на микроскоростях, так и на высоких скоростях резания. На микроскоростях скорость резания менялась от 0,0048 м/мин до 0,960 м/мин.

На фиг. 32 представлены результаты опытов без смазки с передним углом  $30^\circ$ . С меньшим передним углом на микроскоростях по алюминию



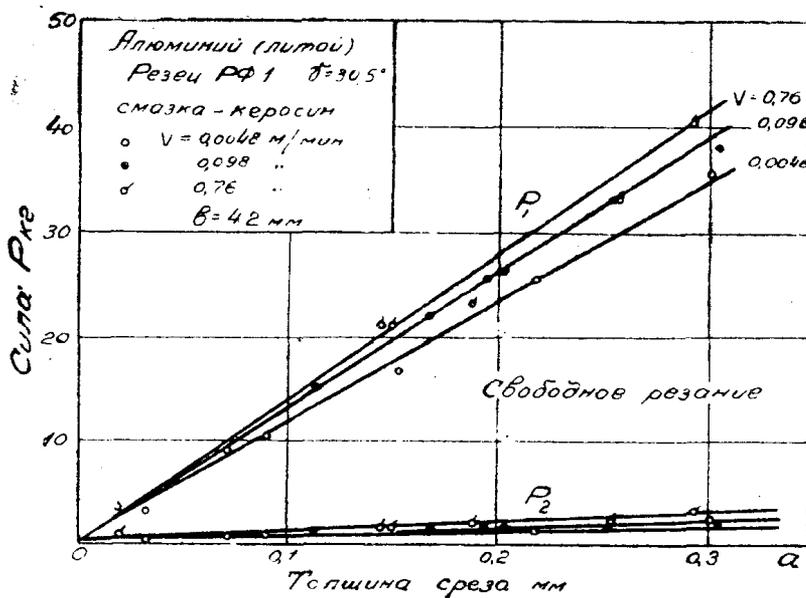
работать не представлялось возможным, так как стружка сходила очень неравномерно, разрушаясь на отдельные элементы. Фиг. 32 показывает, что силы резания изменяются совершенно прямолинейно при изменении толщины среза. С увеличением скорости резания силы резания сильно повышаются. На фиг. 33 показана усадка, полученная при этих опытах. Здесь видно, что толщина среза не влияет заметно на усадку стружки, при



Фиг. 33

повышении же скорости резания усадка заметно растет. Судя по фиг. 32 толщина среза не должна оказывать влияния на коэффициент трения, так как силы  $P_1$  и  $P_2$  расположились на графике совершенно прямолинейно.

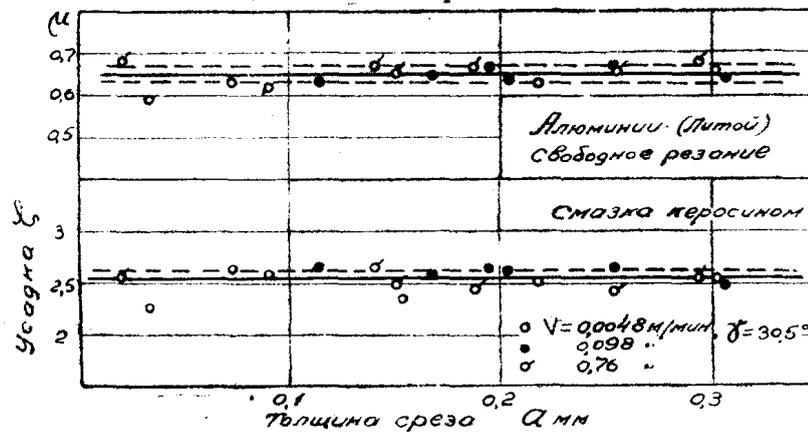
На фиг. 34 представлено изменение сил резания при резании со смазкой. В качестве смазки при резании алюминия нами был применен керосин, который, как показали опыты, совершенно уничтожил слипание стружки



Фиг. 34

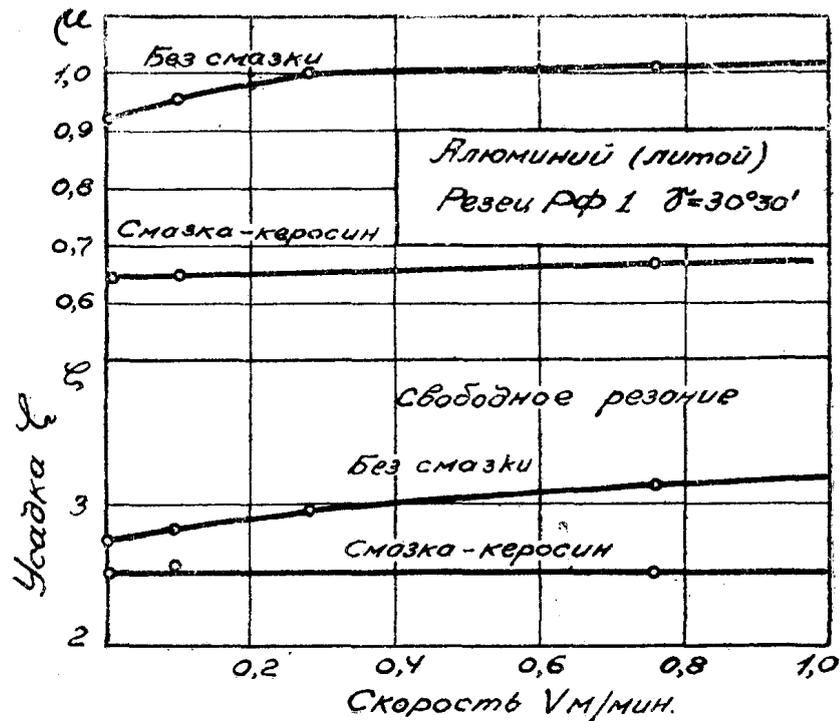
с передней гранью резца, что само по себе указывало на значительное уменьшение коэффициента трения. Из фиг. 34 видно, что при применении керосина силы резания значительно уменьшились, влияние скорости резания также стало менее заметным, но не исчезло совсем, как это мы имели при применении смазки в опытах по стали. На фиг. 35 представ-

лены зависимости усадки стружки и коэффициента трения от толщины среза и скорости при резании со смазкой керосином. Коэффициент трения при резании с керосином не зависит в заметной степени ни от толщины среза, ни от скорости резания. На фиг. 36 дано сопоставление коэффи-



Фиг. 35

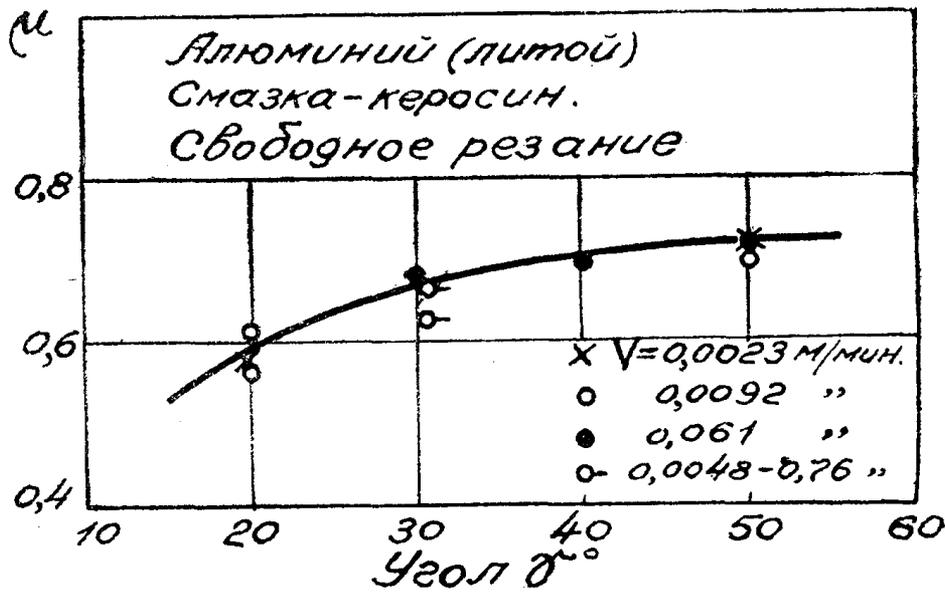
ентов трения и усадок стружки при работе без смазки и со смазкой. При работе без смазки с повышением скорости резания увеличивается как коэффициент трения, так и усадка стружки. Это в свою очередь вызывает увеличение сил резания. При резании со смазкой скорость резания не оказывает влияния на усадку стружки и оказывает совершенно незначи-



Фиг. 36

тельное влияние на коэффициент трения. Отсюда можно заключить, что при резании алюминия со смазкой возрастание сил резания при увеличении скорости является результатом влияния скорости резания, как скорости деформации на свойства прочности алюминия. Это вполне вероятно, так как алюминий сравнительно легкоплавкий металл.

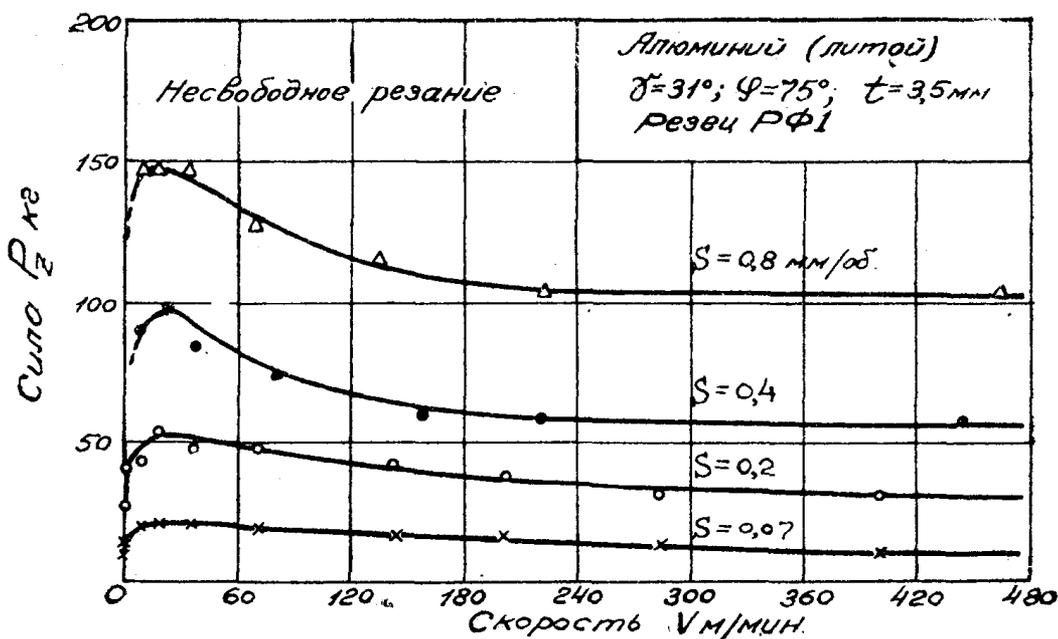
На фиг. 37 представлено влияние угла резания на коэффициент трения при резании алюминия со смазкой керосином при микроскоростях. С увеличением переднего угла коэффициент трения значительно возрастает, т. е.



Фиг. 37

здесь наблюдается то же самое, что мы имели при резании других металлов.

На фиг. 38, 39, 40 представлены результаты измерения сил резания при работе на средних и высоких скоростях. Здесь опыты производились

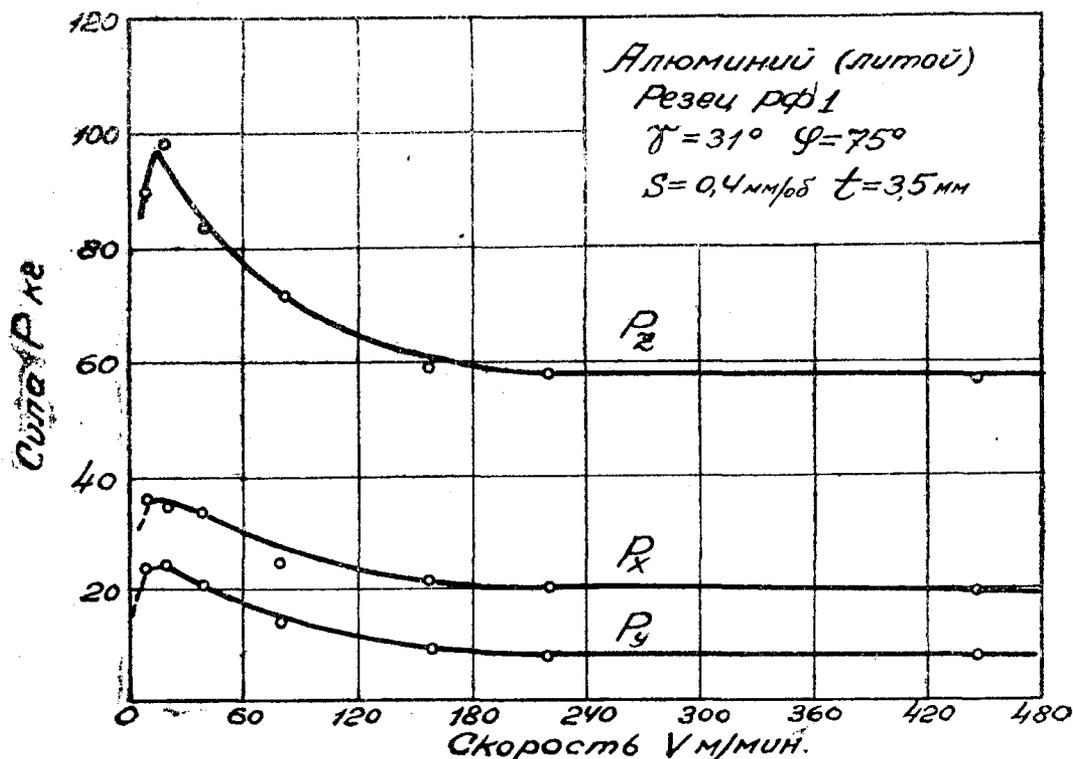


Фиг. 38

методом несвободного резания. Графики показывают, что с увеличением скорости силы резания сначала растут, а затем начинают уменьшаться.

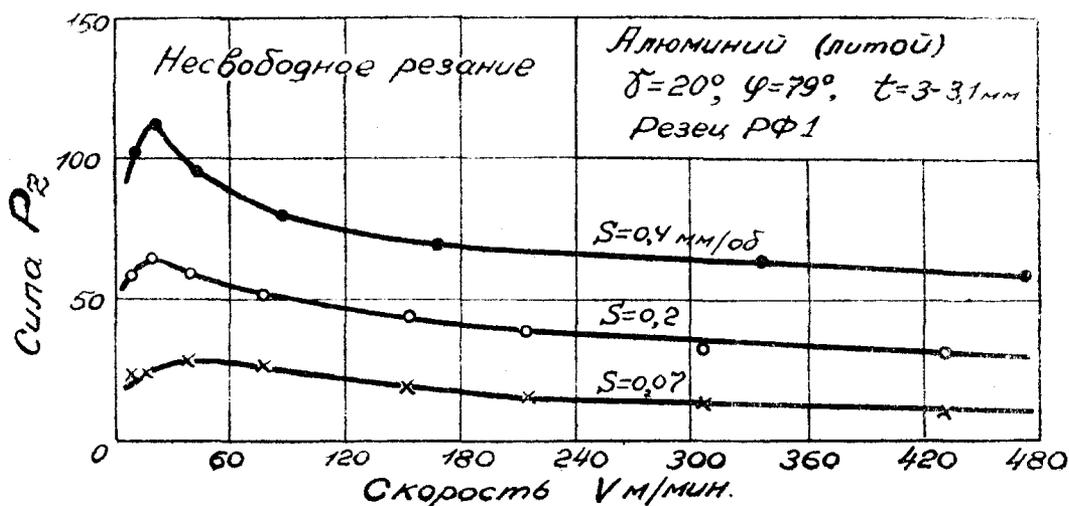
На фиг. 41, 42 представлено изменение коэффициента трения с изменением скорости резания. Коэффициент трения здесь изменяется подобно

тому, как он изменяется при резании стали, т. е. сперва возрастает, достигает наибольшего значения и затем сперва быстро, а дальше медленно уменьшается. Но максимальное значение коэффициента трения здесь дости-



Фиг. 39

гается при меньших скоростях резания, чем при обработке стали. Большему переднему углу здесь опять соответствуют более высокие значения коэффициента трения. Абсолютные значения коэффициентов трения очень

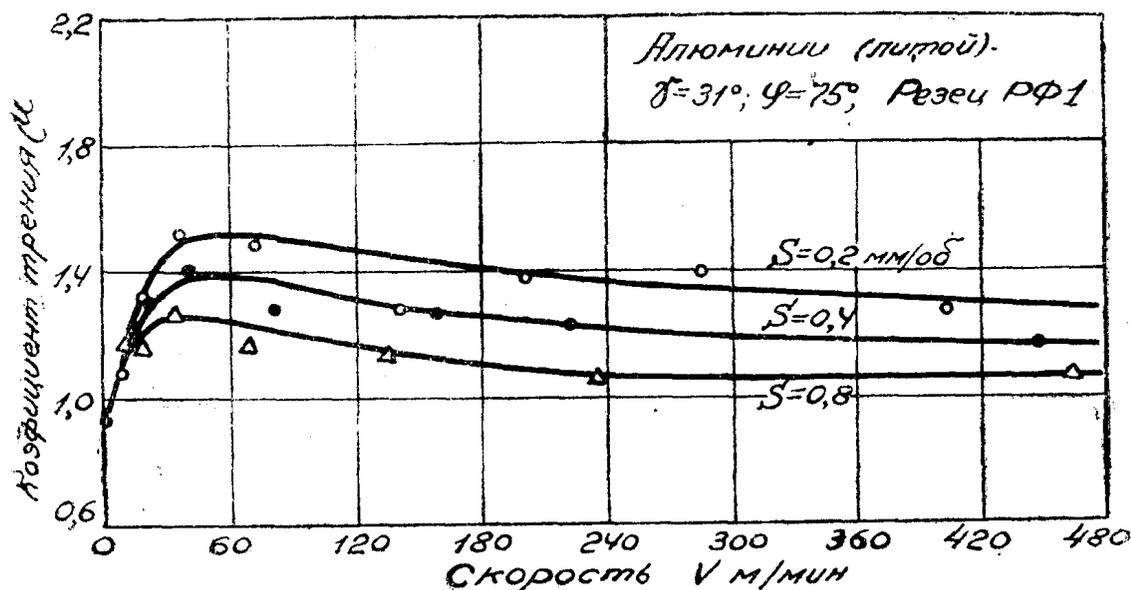


Фиг. 40

высоки. Как показывают графики, они везде, за исключением микроскоростей, выше единицы.

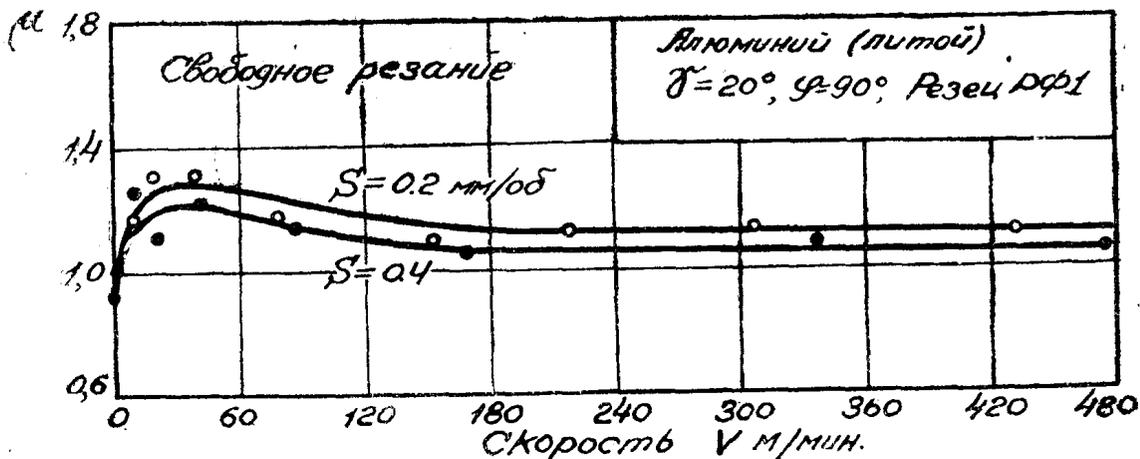
На фиг. 43 представлено изменение усадки стружки с изменением скорости резания. Усадка стружки следует своим изменением за измене-

нием коэффициента трения, но нужно отметить, что в области высоких скоростей резания, несмотря на то, что коэффициент трения уменьшается очень незначительно, почти оставаясь постоянным, усадка стружки продолжает довольно быстро уменьшаться с увеличением скорости резания.



Фиг. 41

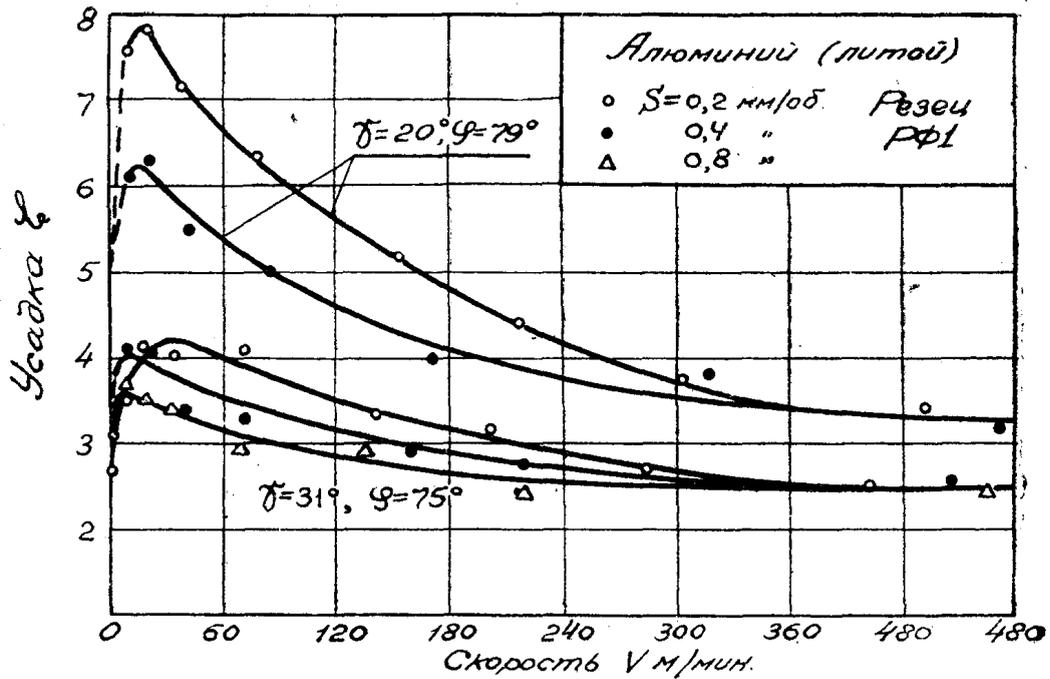
Таким образом, здесь уменьшение усадки не может быть объяснено только уменьшением коэффициента трения. Повидимому, уменьшение усадки стружки здесь вызывается также повышением скорости деформации. С повышением скорости деформации металл становится менее пластичным,



Фиг. 42

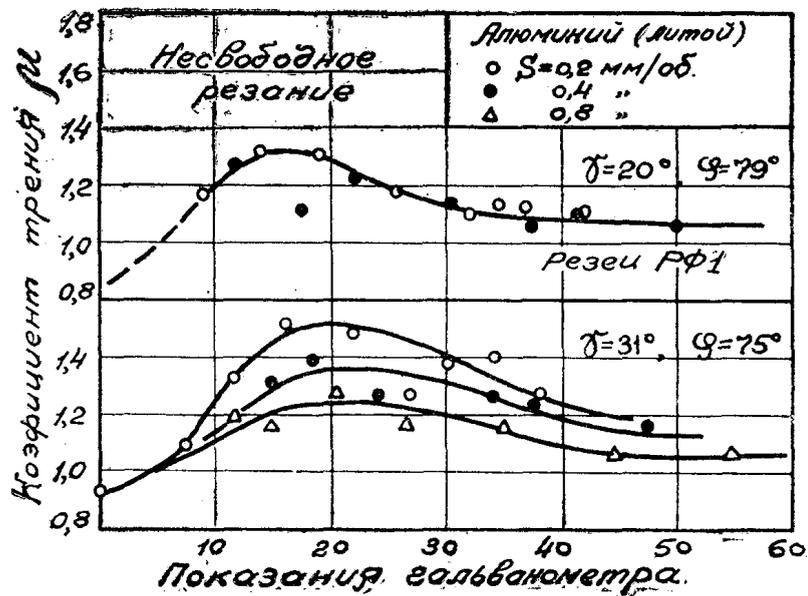
и поэтому усадка уменьшается. Подтверждением этого, повидимому, служит также то обстоятельство, что силы резания в области высоких скоростей резания перестают уменьшаться с повышением скорости резания, несмотря на понижение усадки стружки. Это также является следствием влияния увеличивающейся скорости деформации, так как с повышением скорости деформации свойства прочности металла возрастают.

На фиг. 44 показано изменение коэффициента трения в зависимости от температуры резания, измеренной естественной термопарой. По этому графику создается впечатление, что изменением коэффициента трения управ-



Фиг. 43

ляет температура на передней грани резца, так как кривые коэффициента трения, построенные для разных углов резания и подач, относительно оси температур расположились совершенно одинаково.

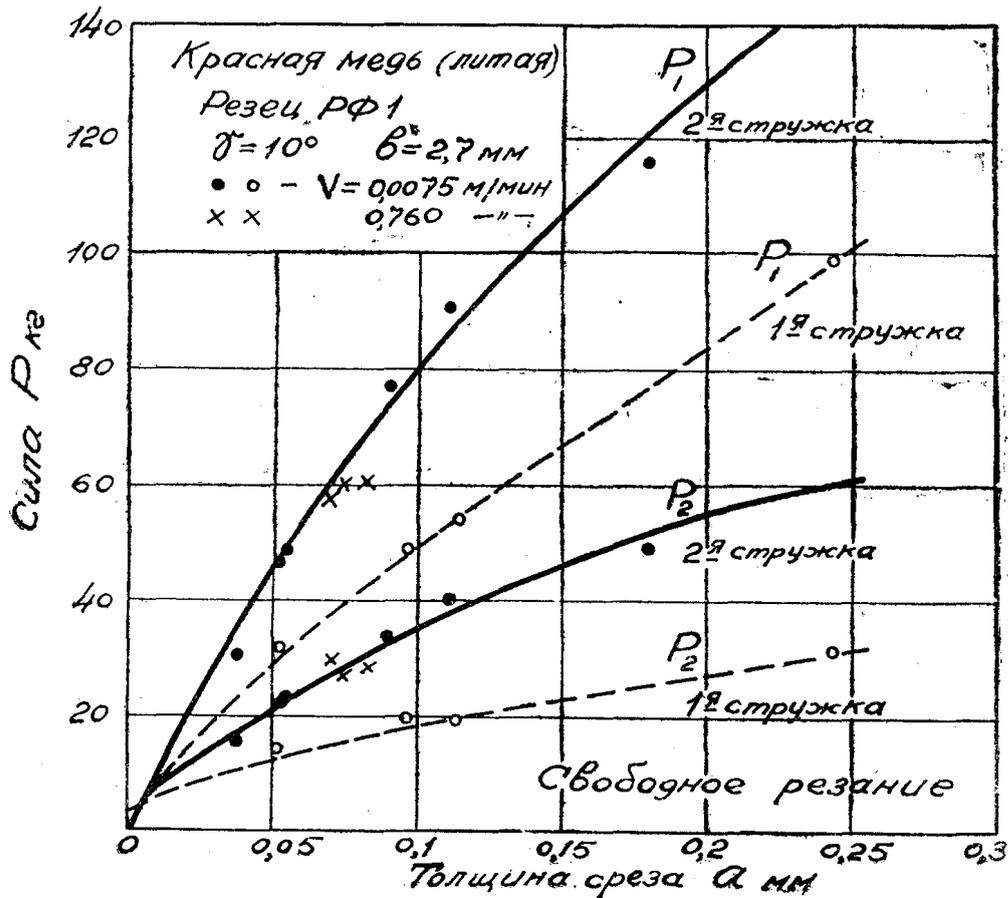


Фиг. 44

### Опыты по резанию красной меди

Опыты по резанию красной меди представляли интерес потому, что этот металл имеет сравнительно высокую температуру плавления и в то же время не дает при резании нароста на резце. К сожалению, в нашем

распоряжении было очень ограниченное количество этого металла, и мы не могли по этой причине провести все те опыты, которые были бы желательны. По этой же причине мы не смогли провести и проверки некоторых опытов путем их повторения. К этому нужно добавить, что единственная болванка красной меди, которую мы имели для опытов, была отлита заводом недостаточно качественно, благодаря чему отливка получилась пористой. Мы сделали попытку силами лаборатории произвести переливку части болванки, получили при этом плотную отливку, но крупнозернистого строения. Все это очень затруднило наши исследования и позволяет поставить некоторые результаты его под сомнение.



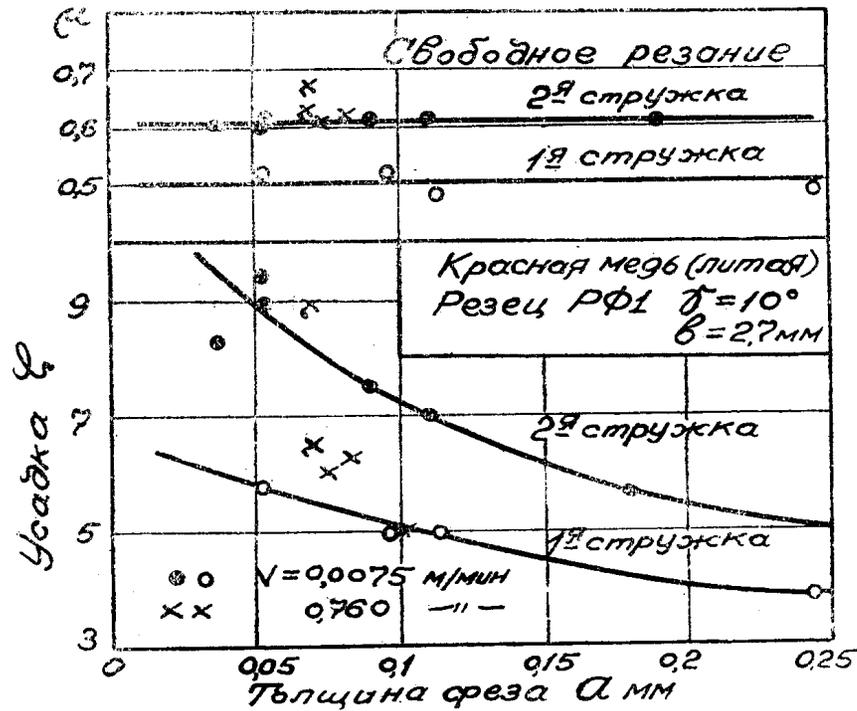
Фиг. 45

Прежде всего мы приведем результаты наших опытов по заводской отливке.

На фиг. 45 показаны результаты измерения сил резания, проведенные на микроскоростях резания. Здесь даны для каждой силы две кривых: для первой стружки и для второй. Перед каждой первой стружкой резец доводился, вторую он снимал без доводки. График показывает, что силы резания для второй стружки получены значительно более высокими. Влияние скорости резания здесь не сказалось. На фиг. 46 приведены результаты подсчетов коэффициента трения и измерения усадки стружки. Коэффициент трения и усадка стружки, так же как и силы резания, получились выше для второй стружки, что вполне закономерно. Коэффициент трения не зависит ни от скорости резания, ни от толщины стружки. Не ясно, почему при постоянном коэффициенте трения усадка стружки падает при увеличении толщины среза (в результате чего и зависимость сил резания

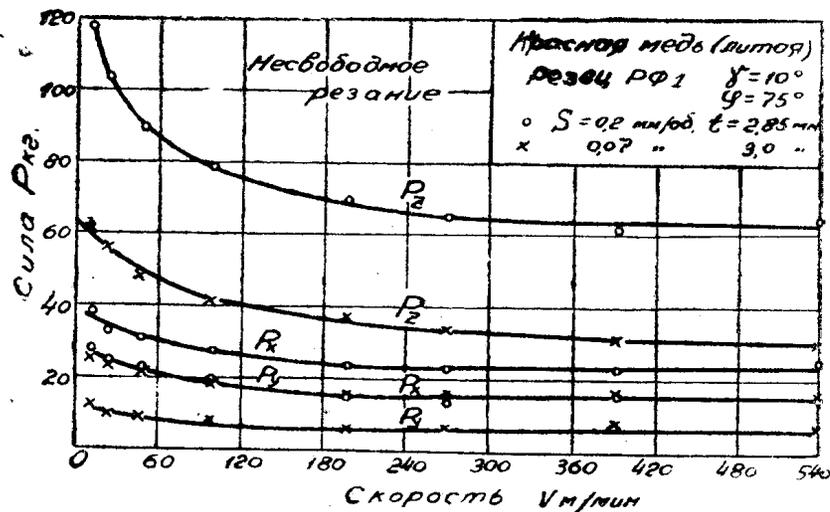
от толщины среза получилась не прямолинейной, а криволинейной). Можно предполагать, что это явилось результатом пористости металла.

На фиг. 47, 48 показаны результаты измерения сил резания на средних и высоких скоростях резания при трех различных подачах. Здесь мы



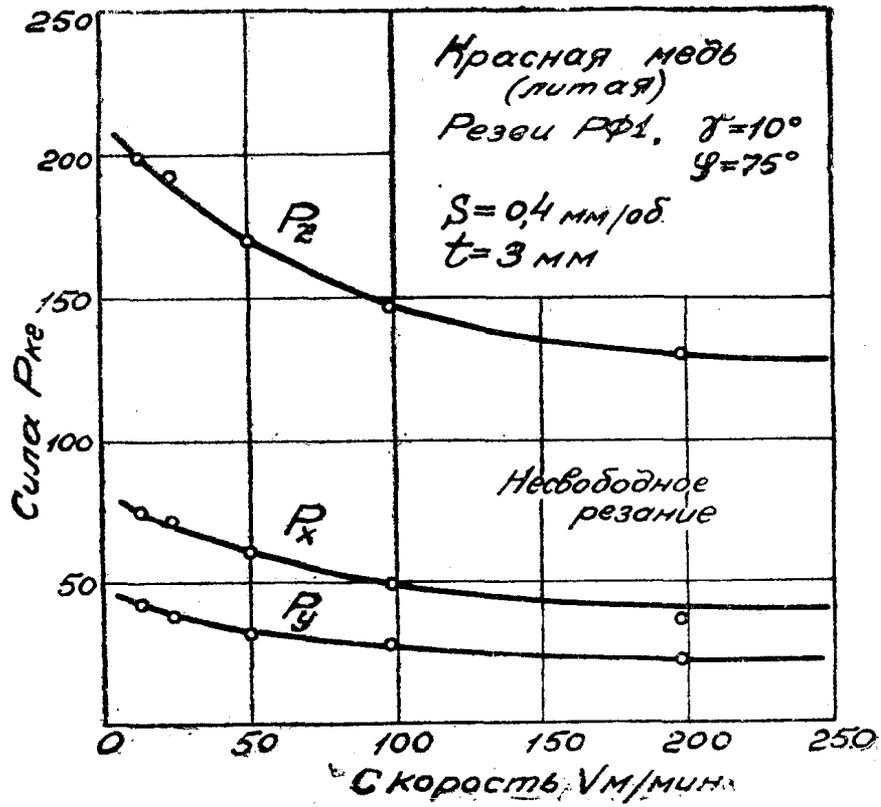
Фиг. 46

наблюдаем очень значительное падение сил резания с увеличением скорости резания. На фиг. 49 показано изменение коэффициента трения, а на фиг. 50—усадки стружки с изменением скорости резания. Коэффициент тре-

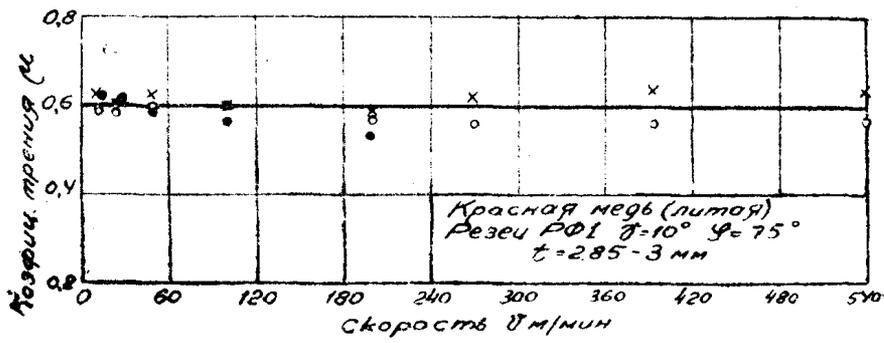


Фиг. 47

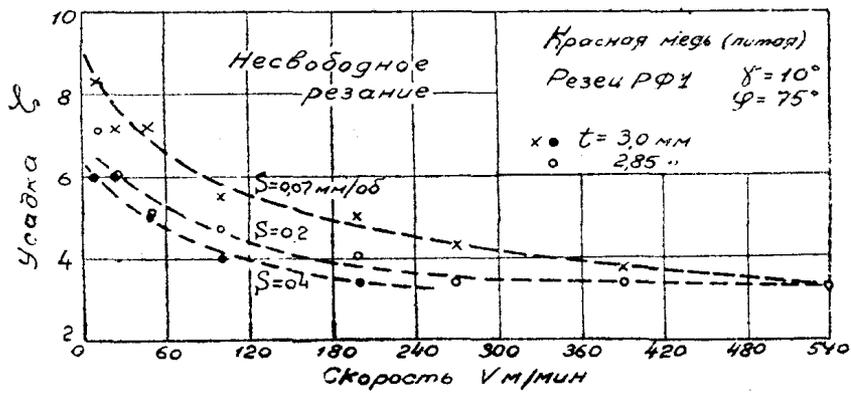
ния остается при изменении скорости резания постоянным, причем его величина совпадает с величиной, полученной на микроскоростях. Усадка стружки понижается с увеличением скорости резания, что в свою очередь



Фиг. 48

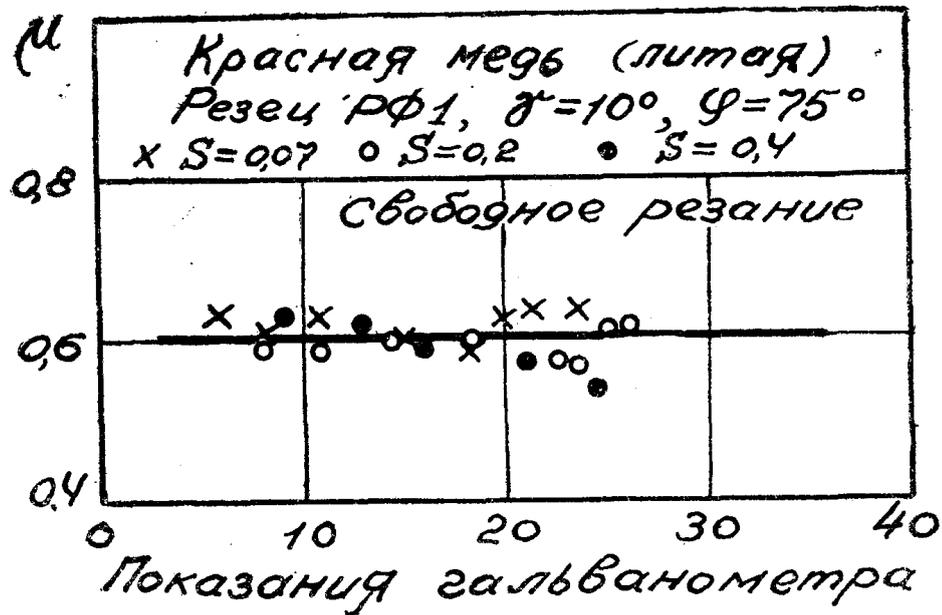


Фиг. 49



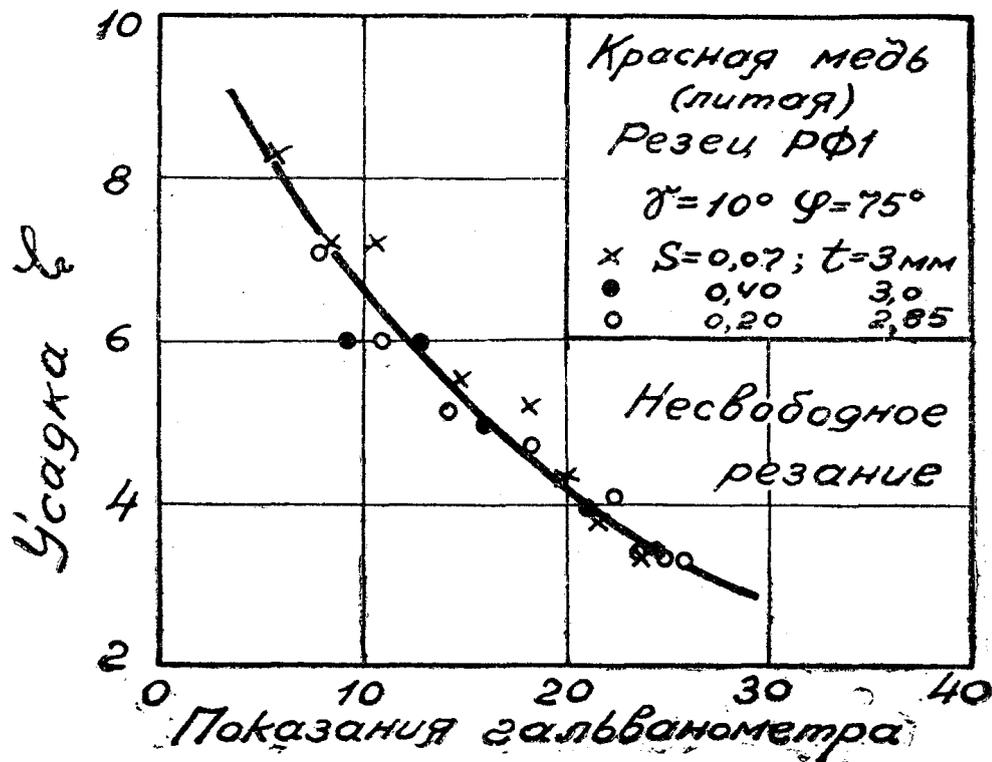
Фиг. 50

вызывает и уменьшение сил резания. На фиг. 51, 52 показано изменение коэффициента трения и усадки стружки при изменении температуры на передней грани резца. Эти графики убеждают нас в том, что при одина-



Фиг. 51

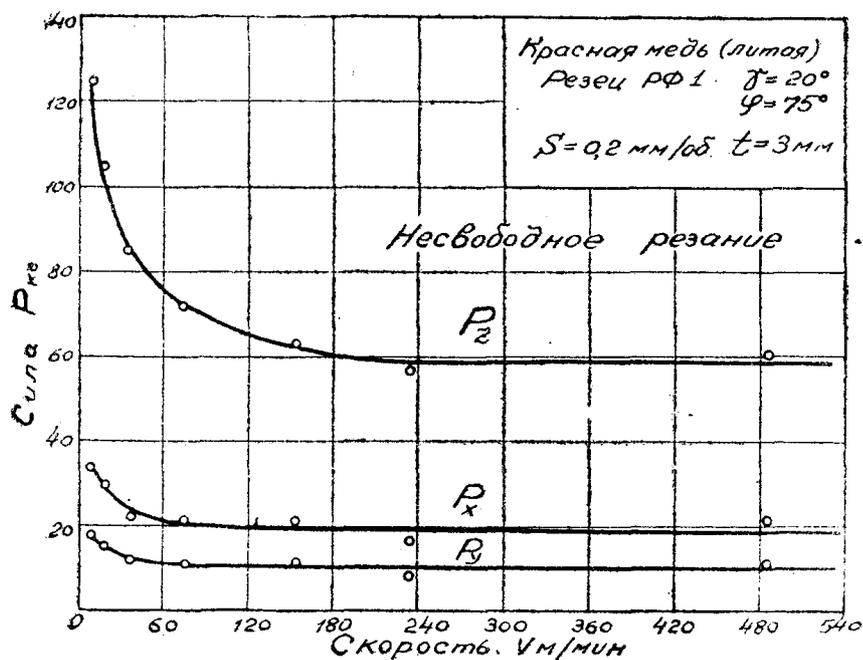
ковых температурах независимо от подачи и скорости резания усадка стружки оказывается одинаковой, что убеждает нас во влиянии температуры, а не скорости резания на усадку стружки. Это вполне вероятно,



Фиг. 52

так как красная медь имеет высокую температуру плавления и влияние скорости деформации на свойства металла должно быть для нее не осо-

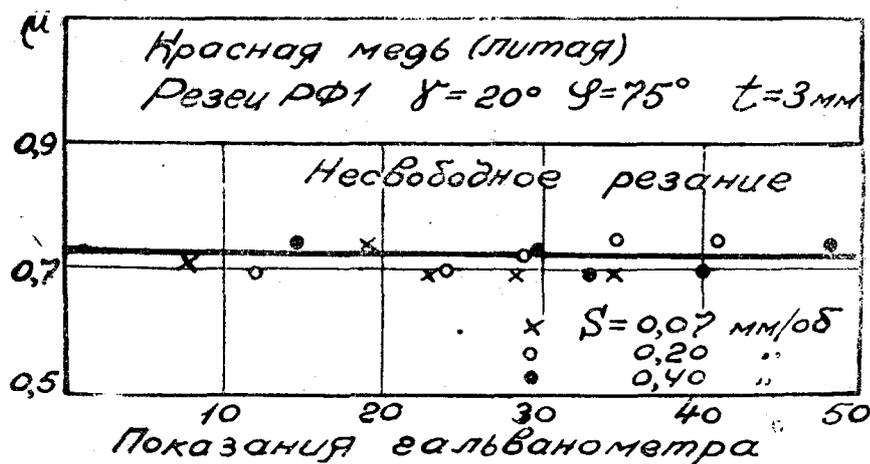
бенно существенным. Мы наблюдаем, что при повышении скорости резания при постоянном коэффициенте трения усадка стружки значительно понижается, то есть здесь наблюдается несоответствие между коэффициентом трения и усадкой стружки. Повидимому, это несоответствие объясняется тем, что при повышении скорости резания повышается темпера-



Фиг. 53

тура и это вызывает изменение первоначальных свойств металла, что приводит к изменению усадки стружки.

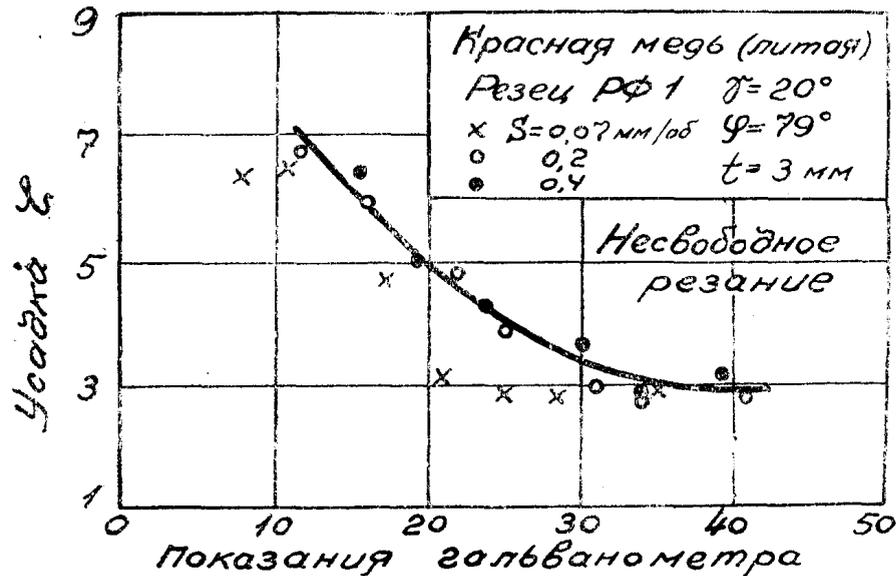
Перейдем к описанию опытов по меди, которая была получена нами путем переливки заводской болванки. На фиг. 53 представлены резуль-



Фиг. 54

таты измерения сил резания для подачи 0,2 мм/об. Как показывают графики, силы резания сперва быстро и значительно уменьшаются, затем остаются постоянными. Подобные же зависимости были нами получены при других подачах. На фиг. 54 показано влияние температуры резания и подачи на коэффициент трения. График показывает, что в пределах широкого изменения температуры и подачи коэффициент трения остается

постоянным. На фиг. 55 показана зависимость усадки стружки от температуры. При сравнении всех этих фигур с соответствующими для красной меди заводского литья можно видеть, что зависимости получились совершенно аналогичными. Коэффициент трения имеет более высокое значение



Фиг. 55

ние для опытов второй серии. Это объясняется тем обстоятельством, что в этой серии опытов у резца был больший передний угол. Таким образом, для красной меди также наблюдается то же самое явление, которое нами отмечалось для других металлов, что коэффициент трения увеличивается с увеличением переднего угла резца.

## Выводы

Мы не даем детального анализа полученных нами результатов. Это будет сделано нами в одной из последующих работ. Сделаем лишь краткое заключение.

1. Для всех металлов, с которыми мы проводили исследование, коэффициент трения при резании повышается с увеличением переднего угла резца.

2. При резании стали резцом одинаковой геометрии коэффициент трения и усадка стружки изменяются с изменением температуры резания, при сохранении же постоянной температуры не зависят ни от толщины среза, ни от скорости деформации.

3. При резании стали материал режущего инструмента оказывает влияние на коэффициент трения и усадку стружки.

4. При резании стали при режимах одинаковых температур коэффициент трения и усадка стружки при постоянной геометрии резца постоянны, а силы резания на передней грани резца прямо пропорциональны толщине среза.

5. При резании стали на микроскоростях с повышением скорости резания коэффициент трения и усадка стружки возрастают, если резание происходит без смазки. Это объясняется уменьшением проникновения на поверхности трения частиц воздуха, оказывающих смазывающее влияние.

6. При резании свинца коэффициент трения и усадка стружки зависят от толщины среза, уменьшаясь с увеличением ее.

7. При резании свинца скорость деформации оказывает влияние на коэффициент трения и усадку стружки. С повышением скорости деформации коэффициент трения и усадка стружки повышаются.

8. При резании свинца с повышением температуры резания коэффициент трения и усадка стружки понижаются.

9. При резании алюминия на микроскоростях коэффициент трения и усадка стружки не зависят от толщины среза. Силы на передней грани резца при этом прямо пропорциональны толщине среза.

10. При резании алюминия с повышением скорости деформации коэффициент трения незначительно повышается.

11. При резании алюминия температура резания оказывает влияние как на коэффициент трения, так и на усадку стружки.

12. При резании красной меди коэффициент трения не зависит ни от скорости деформации, ни от толщины среза, ни от температуры резания.

13. При резании меди усадка стружки уменьшается с повышением температуры резания и не зависит от толщины среза и скорости деформации.

14. Применение смазки при резании очень значительно снижает как коэффициент трения, так и усадку стружки и силы резания.

15. Коэффициент трения при резании может изменяться в зависимости от условий резания и рода обрабатываемого металла в очень широких пределах. Так, при резании без смазки в наших опытах коэффициент трения изменялся при резании стали от 0,55 до 1,7; при резании свинца—от 0,42 до 0,85; при резании алюминия—от 0,93 до 1,5, при резании меди—от 0,6 до 0,7.

---