

Инж. А. М. РОЗЕНБЕРГ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ**

**ТОМСК
1929**

Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки.

ВВЕДЕНИЕ.

В 1848 году француз Coquilhat ¹⁾ произвел опыты на сверлильном станке, с целью определения расхода работы на превращение в стружку единицы объема различных материалов. Это была первая зарегистрированная в литературе попытка исследовать явления, связанные с обработкой металлов резаньем. С тех пор, в течении 80-ти лет, в этой области было произведено большое количество разнообразных опытов и исследований.

В результате всех исследований мы имеем в настоящее время науку, именуемую „теорией резанья металлов“. Однако, при ближайшем знакомстве с этой наукой, можно убедиться в почти полном отсутствии в ней „теоретичности“. Она представляет собой ни что иное, как собрание экспериментально полученных и строго проверенных фактов, связанных целью эмпирических зависимостей, более или менее полно охватывающих трактуемый вопрос, т. е. сплошную эмпирику, без сколько нибудь солидной теоретической базы.

Были попытки подвести теоретический фундамент под некоторые явления, происходящие при резаньи металлов, но все они не увенчались успехом и причину этого нужно искать в том, что до сих пор фактически мы все еще не имеем достаточно исчерпывающих сведений о самой основе всего процесса, именно о явлениях, происходящих в металле при образовании из него стружки.

Опыты, проведенные в этом направлении, не дали согласованных результатов в толковании отдельных вопросов, как не дали и общей стройной картины процесса образования стружки. Некоторые, имевшие место, теоретические исследования вопроса, базируясь на недостаточно полно проведенных опытах предшественников, были насыщены гипотетическими предпосылками авторов относительно течения процесса, априорными предположениями и обобщающими коэффициентами, потому могли дать лишь относительно ценные результаты, и представляют интерес в разрезе истории исследования данного вопроса.

Так как при образовании стружки все явления происходят далеко за пределом упругости, который до сего времени является пределом наших знаний в науке о сопротивлении материалов, то исследование процесса возможно пока только путем эксперимента и, только лишь тогда, когда будет накоплено достаточно опытного материала, возможен будет переход к теоретической разработке вопроса и подведению теоретической основы.

С этой точки зрения ценен всякий более или менее тщательно поставленный эксперимент, расширяющий пределы наших знаний, или даже только подтверждающий ранее найденные положения.

Авторы наиболее старых опытов предполагали явления образования стружки настолько простым, что, по их мнению, достаточно было некоторого ряда опытов для уяснения как общей картины явления, так и деталей его. Ряд последующих работ, открывая все новые неисследованные стороны вопроса, показал насколько сложен он по самой своей сущности.

В предлагаемой работе мы отнюдь не думаем охватить процесс образования стружки полностью, и будем вполне удовлетворены, если наша работа послужит хотя бы к некоторому разъяснению исследуемого явления.

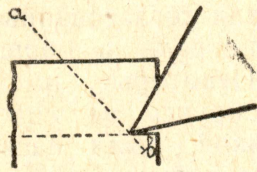
Прежде чем приступить к описанию наших опытов, дадим краткую историческую справку об известных нам работах, затрагивающих процесс образования металлической стружки.

Исторический обзор.

Опыты проф. Тиме в 1870 г. ²⁾ Горный инженер, впоследствии профессор И. Тиме производил свои опыты на Луганском заводе, пользуясь при этом строгальным станком. Материалами для опытов служили: железо, сталь, бронза, чугун, свинец и цинк. Резцы употреблялись с углами резанья: $\alpha = 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ и 90° . Стружки при обработке железа снимались толщиной от $\frac{0,75''}{16} = 1,19$ мм. до $\frac{1,75''}{8} = 5,56$ мм., при обработке стали от $\frac{1}{8}'' = 3,18$ мм. до $\frac{1,75''}{8} = 5,56$ мм.

Обработка железа и стали производилась с применением смазки резца, остальные материалы обрабатывались без смазки.

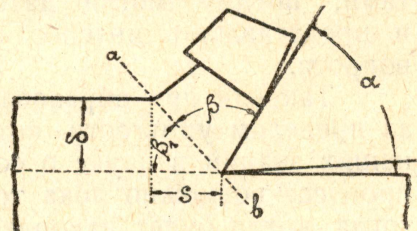
Тиме дал на основании своих наблюдений теорию образования стружки. По его мнению сопротивление металлов резанью можно рассматривать как сумму элементарных сопротивлений скалыванию. В случае вязкого металла процесс отделения и образования стружки представляется в таком виде:



Черт. № 1.

Под влиянием действующей силы резец при своем движении вдавливаются в обрабатываемый кусок металла, сжимая его своей передней гранью (черт. 1). Сжатие продолжается до тех пор, пока не произойдет скалывание первого элемента стружки в определенном направлении „ab“. Это наступает в том момент, когда составляющая в направлении „ab“ сила сжатия на плоскости соприкосновения резца и стружки будет равна сопротивлению металла скалыванию в сечении „ab“. После начала скалывания первого элемента, возникает сдавливание второго элемента и последующее скалывание по тому же направлению „ab“ (черт. 2). При сдавливании каждого последующего элемента, вследствие выпучивания металла, происходит поворачивание предыдущего элемента стружки, отставание его от плоскости резца и создается явление завивания стружки.

Под влиянием действующей силы резец при своем движении вдавливаются в обрабатываемый кусок металла, сжимая его своей передней гранью (черт. 1). Сжатие продолжается до тех пор, пока не произойдет скалывание первого элемента стружки в определенном направлении „ab“. Это наступает в том момент, когда составляющая в направлении „ab“ сила сжатия на плоскости соприкосновения



Черт. № 2.

По наблюдениям автора направление скалывания „ab“ всегда вполне определенно и зависит от величины угла резанья α , при чем изменяется очень незначительно, так что угол β_1 (черт. 2) является величиной примерно постоянной. Наблюдая направление скалывания на боковой поверхности куска металла, Тиме пришел к заключению, что сжатие металла перед резцом имеется лишь до линии „ab“ в пределах угла β ; за линией „ab“, в пределах угла β_1 , металл совершенно не деформирован. Из того же наблюдения им установлены следующие величины углов β и β_1 в зависимости от угла резанья „ α “ для различных обрабатываемых материалов:

Таблица № 1.

Угол \ Металл	Ж е л е з о					С в и н е ц					Ц и н к				
	α	45°	55°	65°	75°	90°	45°	55°	65°	75°	90°	45°	55°	65°	75°
β	100°	90°	85°	75°	65°	100°	90°	80°	70°	62°	100°	85°	85°	75°	60°
$\alpha + \beta$	145°	145°	150°	150°	155°	145°	145°	145°	145°	152°	145°	140°	150°	150°	150°
β_1	35°	35°	30°	30°	25°	35°	35°	35°	35°	28°	35°	40°	30°	30°	30°

Автор замечает явление усадки стружки, (снятая стружка оказывается короче пути, пройденного резцом), и главной причиной ее считает относительное перемещение элементов в процессе ее образования.

Длина стружки, состоящей из „n“ элементов, может быть выражена

$$l_1 = n \cdot e_1,$$

где e_1 длина одного элемента;

Длина пути пройденного резцом:

$$l_0 = n e_0$$

где e_0 длина элемента в направлении движения резца (см. черт. 3).

Коэффициент усадки будет:

$$K_0 = \frac{l_1}{l_0} = \frac{e_1}{e_0} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} = \frac{\sin \beta_1}{\sin (180^\circ - \alpha - \beta_1)} \dots \dots \dots (1)$$

По данным Тиме коэффициент усадки колеблется для железа и угла резанья $\alpha = 45^\circ$ от 0,59 до 0,65; для $\alpha = 75^\circ$ от 0,45 до 0,48. Колебания в значениях коэффициента усадки K_0 для одних и тех же значений „ α “, при одном и том же материале, Тиме объясняет очень незначительными колебаниями величин β и β_1 при изменении толщины снимаемого слоя „ δ “, при больших же „ α “, также раз'единением элементов стружки между собой.

Проф. Афанасьев³⁾ в 1888 году произвел теоретическое исследование процесса резанья. Основной целью являлось определение усилия резанья аналитическим путем. Попутно автор в'дается в разбор процесса образования стружки. Течение этого процесса им мыслится следующим образом:

При движении клина—резца, длина стружки, лежащей на наклонной его грани, постепенно достигает наибольшей возможной величины, при чем действующие силы получают свою максимальную величину и могут быть найдены из условия наступающего в этот момент разрушения стружки. При предположении, что давление на конце стружки, противоположном лезвию достигает величины сминающей материал, разрушение стружки происходит одним из трех возможных способов: или она надламывается, или скалывается, или же в материале получается трещина, совпадающая с направлением движения резца. Последний случай может встретиться при резаньи дерева вдоль волокон с малыми углами резанья.

В результате целого ряда выкладок автор, находит положение равнодействующей силы, действующей на стружку, принимает, что скалывание или излом стружки должны происходить в плоскости параллельной этой равнодействующей и таким образом определяет углы наклона плоскостей скалывания к направлению движения резца, значение которых по его данным зависит лишь от величины угла резанья и от коэффициента трения стружки по резцу. Если этот последний принят равным 0,46, то значение углов наклона плоскостей получается очень близкими к полученным по опытам проф. Тиме. Величина их является постоянной при определенном материале и неизменяемом угле резанья.

Базируясь на выводах М. Tresca ⁴⁾, автор полагает, что основной причиной усадки стружки является сжатие материала перед резцом. Выражение для коэффициента усадки стружки дается Афанасьевым в виде:

$$K_0 = \frac{l_1}{l_0} = \frac{\cos(\alpha + \Theta)}{\cos \Theta} \dots \dots \dots (2)$$

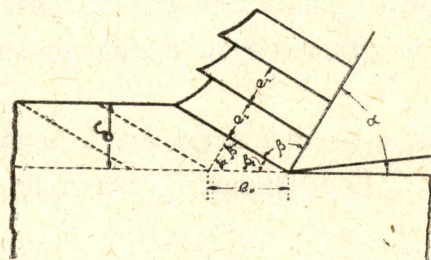
где $\pm \Theta = \pm (\beta - 90^\circ) = \pm (90 - \alpha - \beta_1)$ по обозначениям черт. № 3. При подстановке этих значений вместо Θ в выражение для коэффициента усадки проф. Афанасьева, получим формулу (1), данную проф. Тиме, приведенную уже нами ранее.

Автор приходит к выводу, что движение стружки по резцу происходит в сторону к лезвию резца и сила трения, возникающая при этом между стружкой и резцом, направлена в сторону, обратную движению стружки, т. е. от лезвия резца.

Проф. Зворыкин ⁵⁾ в 1893 г. произвел экспериментальное и теоритическое исследование, в результате которого дал аналитическое выражение для усилия резанья и работы, необходимых для отделения стружки.

Автор предполагает при образовании стружки или наличие деформации изгиба, или деформации скалывания, но так как явление изгиба далеко за пределом упругости чрезвычайно сложно и мало изучено, он считает возможным рассматривать лишь образование стружки путем деформации скалывания.

Кладя в основу своей теории образования стружки, в общем сходной с теорией проф. Тиме, предположение, что плоскость скалывания, наклоненная под углом β_1 к линии движения резца, будет



Черт. № 3.

всегда расположена так, что потребуется минимум силы для образования стружки, Зворыкин находит аналитически положение плоскостей скалывания и выражение для угла β_1 в следующем виде:

$$\beta_1 = 90 - \frac{\varphi + \varphi_1 + \alpha}{2} \dots \dots \dots (3)$$

Здесь: α — угол резанья, $\text{tg } \varphi = f$, $\text{tg } \varphi_1 = f_1$, где f — коэффициент трения стружки по резцу, а f_1 некоторый коэффициент, зависящий от упругих и пластических свойств данного материала, от величины внутреннего трения частиц в нем, и показывающий, какая часть сжимающей стружку силы передается на плоскость скалывания нормально к ней, возбуждая тем самым добавочную величину внутреннего трения на плоскости скалывания и усиливая сопротивление стружки скалыванию.

Автор принимает для железа и стали $f = 0,44$ и $f_1 = 0,34$, при этом из формулы (3) получаются следующие величины углов при различных углах резанья (см. таблицу № 2).

Таблица № 2.

Углы \ Материал	Ж е л е з о и с т а л ь				
α	45°	55°	65°	75°	90°
β_1	46,5°	41,5°	36,5°	31,5°	24°
$\alpha + \beta$	133,5°	138,5°	143,5°	148,5°	156°

Таким образом величина угла скалывания зависит лишь от угла резанья и свойств обрабатываемого материала.

Погоржельский⁶⁾ в 1907 году, путем чисто теоретических рассуждений, при предположении, что положение плоскости скалывания определяется наличием максимального скалывающего напряжения при действии постоянной силы от резца, нашол величины углов скалывания, которые довольно близки с данными Тиме и зависят от угла резанья, коэффициента трения между стружкой и резцом и коэффициента внутреннего трения в материале.

Соколов⁷⁾ в 1914 году, основываясь на процессе образования стружки, искал наивыгоднейший, в смысле устранения возможности дрожания, профиль обдирочного резца. Автор принимает неоспоримой теорию образования стружки проф. Тиме. Произведя измерения усадки стружки, Соколов нашел, что усадка уменьшается при увеличении толщины стружки, кроме того, что количество элементов стружки скалывания увеличивается с уменьшением толщины стружки и с уменьшением угла резанья. Соколов оспаривает пригодность формулы усадки проф. Тиме для стружки скалывания, т. к. по его мнению, форма элемента стружки, получаемая в действительности, не сходна с той, которая удовлетворяла бы выражению для вычисления усадки.

Усачев⁸⁾ в 1914 году предпринял опыты с целью определения температуры рабочей части лезвия резца. Изучение процесса образования стружки было предпринято попутно для общего раз'яснения и увязки явлений. Опыты по изучению строения стружки производились на строгальном станке, у которого стол приводился в движение ходовым винтом. Стружка снималась и оставлялась на обрабатываемом куске, путем перемены направления хода стола, причем автор полагает, что скорость конечного момента образования стружки равна скорости резанья в середине хода стола.

Разламывая полученные стружки, Усачев заметил, что излом происходит не по линии раздела элементов, и не по ей параллельной, а по направлению делающему с первым угол примерно в 30° . Из этого он заключает, что в отдельных элементах в этом направлении происходят сдвиги.

Измеряя температуру у кончика резца и несколько отступя, Усачев получил результаты, сходные с выводами Тэйлора и Никольсона: температура кончика оказывалась обыкновенно ниже, чем температура точки несколько отстоящей от кончика. Усачев относит это явление не за счет нахождения центра давления стружки на резец на некотором расстоянии от конца резца, как об этом говорят упомянутые авторы, но за счет того, что самый кончик резца защищен, как он думает, образующимся на нем наростом, от перегрева. Придя к такому заключению, автор изучает условия образования нароста на резце.

По мнению Усачева нарост состоит из материала, чрезвычайно спрессованного перед рабочей поверхностью резца в том месте, где его лезвие отделяет стружку. „Характер строения, пишет автор, показывает, что этот слой спрессован, не принадлежит ни стружке, ни предмету и движется вместе с лезвием во время резанья“. Наличием нароста автор объясняет образование неровностей (зазубрин) на стружке и на обработанной поверхности.

Усачев заметил, что пластические деформации перед резцом выходят за пределы угла β и распространяются также и в обработанной поверхности; это им было замечено на шлифованной боковой поверхности образца.

Усачев, первый из русских, пользовался металлографическим методом для изучения строения стружки.

Заднепровский⁹⁾ в 1918 г. повторил опыты проф. Тиме со свинцом. Наблюдение производились на боковой поверхности образца. Замечено, что пластическая деформация перед резцом выходит из пределов данных Тиме углов β , распространяется также и под резцом. Произведены были измерения коэффициентов усадки для свинца при угле резанья $\alpha = 45^\circ$ и различных толщинах стружки.

Корсток¹⁰⁾ в 1923 году исследовал применимость и сравнительную выгодность нового профиля резцов. Часть работы была направлена на изучение процесса образования стружки, но ввиду того, что основная цель была иная, этой части ее уделено слишком мало внимания.

Образование стружки производилось на строгальном станке, при чем была попытка заснять путем кинофильмы последовательные стадии процесса. Но опыт показал, что количество изображений, получаемых в единицу времени, слишком мало для расчленения процесса на отдельные стадии. Поэтому, чтобы зафиксировать желаемую стадию процесса, пришлось приводить станок в движение вручную, фото-

трафируя в нужные моменты с небольшим увеличением боковую поверхность стружки и образца, с деформациями при этом происходящими.

Фотографии вполне подтвердили основное положение, проф. Тиме, что процесс резанья состоит из последовательного скалывания слоев стружки.

Кроме наблюдения явления на боковой поверхности образца были приготовлены микро-шлифы из разрезов стружки и сфотографированы. В результате всего было установлено, что процесс разбивается на три стадии: 1—надрез материала резцом, 2—распространение идущей впереди кончика резца трещины, 3—скалывание образовавшегося элемента стружки.

Herbert E. G.¹¹⁾ 1923 г. Целью опытов было определение способности к нажещению обрабатываемого материала при его обработке резаньем и установление специального метода для испытания материала на вышеназванную способность к нажещению. Для опытов были взяты семь различных материалов, в число которых входили железо, сталь, чугун и медь. Испытания на твердость производились путем специального изобретенного автором маятникового прибора, неизвестного до того времени. Способы испытания выработаны были самим автором. На токарном станке производилось резанье при глубине рез. $t = 6,4$ м.м., подаче $s = 0,94$ мм/об. и скорости резанья 19,8 м/мин. Станок внезапно останавливался так, что стружка оставалась не отделенной в месте резанья от обрабатываемого материала. Из стружки вместе с обрабатываемым предметом готовился шлиф, на котором и определялась в разных местах твердость, величина которой затем сопоставлялась с первоначальной твердостью материала. Упомянутое исследование для нас имеет интерес только в той части своей, которая имеет непосредственное отношение к нашей работе. Автор при рассмотрении полученных шлифов заметил наличие нароста (кромочного придатка) у кончика резца и сделал некоторые предположения о его образовании и роли при обработке металла. Образование его автор относит как за счет отделения металла от стружки, так и за счет отделения такового от основной массы образца. Будучи сильно спрессован и подвержен воздействию высокой температуры, развивающейся при резаньи у кончика резца, клинообразный нарост получает чрезвычайно высокую твердость, много превышающую твердость основного материала. Стружка, отделяемая от основного материала, в результате пластических формоизменений также получает высокое нажещение, правда более низкое, чем кромочный нарост, при чем волна повышения жесткости распространяется перед стружкой впереди на пути резца таким образом, что величина нажещения повышается при приближении к носику резца.

W. Rosenhain and Styrney 1925 г.¹²⁾ Опыты были предприняты с целью разъяснения строения стружки и процесса отделения ее. Проводились опыты на токарном станке. В болванке из стали или из литой латуни заранее пробирились канавки таким образом, чтобы оставшиеся между канавками бурты могли срезаться во время опыта и служить материалом для образования стружки. Стружка снималась со скоростью 1,27 метра в минуту теоретическим резцом с прямолинейным профилем. Размеры резцов были $1/2'' \times 1/4''$. Верхний угол у резца менялся от 30° до 0° , в соответствии с чем угол резанья менялся от 60° до 90° . Передний угол менялся от 0° до 20° . Глубина резанья (толщина стружки) изменялась от $0,002''$ до $0,05''$, то-есть от 0,05 до 1,27 м/м.

После образования стружки и остановки станка, стружка отрезалась с прилегающей частью материала, разрезалась вдоль, шлифовалась и подготавливалась путем травления для рассматривания.

Авторы делят все получающиеся стружки по их виду и характеру образования на три типа:

1. тип стружки отрыва,
2. " " скалывания
3. " " сливной.

Первый тип образуется, по мнению авторов, в случае большого угла резанья и большой глубины резанья. Второй тип образуется в случае большого угла резанья и малой глубины резанья. При этом типе превалирует уже не отрывающее действие, но скольжение (скалывание) по некоторой плоскости. В стружке у поверхности резца образуется зона больших деформаций, при чем ее верхняя граница, отделяющая ее от остальной стружки, всегда перпендикулярна к направлению скалывания. Этот тип стружки наиболее распространен. Тип сливной стружки характеризуется тем, что главная зона глубоких деформаций более ясно отделена, чем в других типах. Плоскость, отделяющая зону глубоких деформаций от остальной стружки, составляет постоянный угол в 60° с направлением движения резца и 90° с направлением какого, судя по фотографиям, является границей между деформированной стружкой и обрабатываемым материалом. С уменьшением угла резанья, зона глубоких деформаций уменьшается и, когда угол резанья достигает 60° , она совершенно исчезает. Тем самым авторы высказывают мысль, что стружка старается всегда создать себе угол резанья равный 60° , т. к. зона глубоких деформаций, по мнению авторов, идентична с кромочным придатком и составляет одно целое с снимаемой стружкой. Присутствием же зоны глубоких деформаций объясняют авторы и явление завивания стружки. Авторы считают, что стружка скользит по кромочному придатку и, встречая плоскость резца, отгибается ею. Меньшую роль при завивании стружки играют сдвиги последовательных частей ее, что, однако, при угле резанья меньшем 60° , т.-е. когда уже отсутствует зона глубоких деформаций, заставляет стружку виться.

Втечение последнего времени вошел в употребление и получил некоторое распространение оптический метод изучения напряжений. Сущность этого метода основана на том, что прозрачные изотропные тела при наличии в них угругих или пластических деформаций делаются двупреломляющими и в поляризованном свете дают яркую цветную картину распределения в них напряжений под влиянием действующих сил¹³). При этом можно не только распознать знак действующего в какой-либо точке тела напряжения, но и определить его величину. Было доказано, что, в случае плоской задачи, картину распределения напряжений, полученную в стекле, ксилоните или другом изотропном теле, можно распространить и на употребляемые в машиностроительной практике материалы, в частности на металлы и таким образом стало возможным, приготовив из стекла или ксилонита точную модель детали или плсского механизма и поместив ее в условия, подобные тем, в которых работает деталь, получить картину распространения напряжений, определить наиболее слабые места детали и, часто,

найти правильный подход к решению той или иной предлагаемой практической задачи, на которую не имеется решения в теории.

Были произведены некоторые испытания и в области резанья металлов.

Профессор С. Г. Сокер¹⁴⁾ в 1922 году произвел опыты с токарными резцами, каковые им были проделаны впоследствии и для строгальных резцов и фрез¹⁵⁾, для чего им был сконструирован специальный прибор с поляризационной установкой. Материалом для опытов служила целлюлоза. Кроме того, некоторые результаты проверялись непосредственно на металле (латунь и сталь), для чего пользовались шепингом или токарным станком.

Было найдено, что перед резцом впереди распространяется деформация сжатия, под резцом и сзади резца деформация растяжения, причем волна упругих деформаций, как в том, так и в другом направлениях распространяется довольно далеко от места резанья.

В случае фрезерной работы, когда в действии находятся несколько резцов одновременно, напряжения сжатия перед резцом постепенно уменьшаясь, меняет знак, превращаясь в напряжение растяжения при приближении к месту действия впереди—идушего резца. Были вычислены величины этих напряжений для нескольких случаев и представлено графически их изменение. При резцах с малыми режущими углами наблюдалось подхватывание и оттягивание кверху обрабатываемой поверхности; при больших углах резанья это явление исчезало.

Применяя резец из стекла и обрабатывая им материалы из целлюлозы, было найдено распределение упругих напряжений и в резце.

Профессор Зайцев¹⁶⁾ среди многочисленных иных опытов испытывал также и действие резцов. Наблюдения показали, что чем меньше угол резанья, тем легче идет образование стружки, при чем резец с малым углом отрезает стружку, с большим же—откальвает ее. В начале резанья нагрузка на резец и деформация в стружке больше чем в последующее время, когда процесс установился. В начале резанья наибольшее давление сосредотачивается у самого лезвия резца, в последующее же время центр наибольшего давления несколько смещается вверх от лезвия. Предельный угол области остаточных деформаций оказался при опытах резанья ксилонита между 135° и 155° с направлением движения резца.

Закончив исторический обзор, переходим к описанию проделанных нами опытов.

Цель и метод предпринятого исследования.

Первоначальной целью нашей работы являлось:

1) Проверка данных проф. Тиме относительно углов скалывания β_1 , их постоянства при постоянном угле резанья " α " и характера изменений их с изменением " α ". Этот вопрос являлся интересным потому что во всех ранее проведенных исследованиях углы β_1 измерялись на боковой поверхности образца и могли быть несколько иными, в силу искажений, чем в толще материала. Мы намеревались измерять их в среднем сечении образца.

2) Определение глубины распространения пластических деформаций перед резцом и под ним, в обработанной уже поверхности, при различных углах резанья и толщинах снимаемого слоя.

Попутно был затронут вопрос об усулке стружки и выяснена зависимость коэффициента усулки от различных причин, а также некоторые иные явления, связанные с процессом образования стружки, что станет ясным из последующего изложения.

Если мы обратим внимание в изложенных выше исследованиях, какими методами пользовались экспериментаторы, то будем иметь возможность проследить постепенное изменение методики эксперимента, причем это изменение будет характеризоваться повышением точности опыта с одной стороны и уверенности в достоверности полученных результатов с другой. Тиме²⁾, Зворыкин⁵⁾, Заднепровский⁹⁾ и некоторые другие наблюдали протекания процесса образования стружки на боковой, предварительно отполированной поверхности образца, причем резанье производилось со скоростью, близкой к нулю, чтобы иметь возможность фиксировать отдельные стадии явления. В 1905 году проф. Курейном¹⁷⁾ впервые для исследования строения стружки был применен метод металлографического исследования под микроскопом с предварительным выявлением структуры путем травления. Усачевым⁸⁾ применялись как первый, так и второй из описанных методов; последующие опыты Соколова⁷⁾ Herbert'a¹¹⁾, Rosenhain'a¹²⁾ пользовались исключительно методом металлографического исследования. Klops-tok¹⁰⁾ наряду с металлографическим пытался применить метод кинематографической съемки динамики протекания процесса резанья на поверхности образца. Наконец проф. Сокер¹⁴⁾ и проф. Зайцев¹⁶⁾ применили наиболее тонкий метод оптического исследования, при чем однако, они были стеснены в выборе обрабатываемого материала.

Метод металлографического исследования несомненно имеет ряд преимуществ перед более старым методом наблюдения протекания явления на поверхности образца. Ввиду того, что при снимании стружки некоторой конечной, отличной от нуля ширины мы неизбежно сталкиваемся с явлениями изменения формы, протекающими не только в направлении движения резца, но и в направлении ему перпендикулярном, именно в направлении ширины стружки, естественно будет предположить, что картина протекания деформаций внутри образца будет несколько иная, хотя и подобна той, которую мы имеем на боковой поверхности. Наличие поперечного уширения стружки, на которое уже обратил внимание Тиме, искажает явление, наблюдаемое на поверхности образца, подтверждая тем самым обоснованность нашего предположения и указывая, кроме того, на невозможность использования оптического метода исследования, применимого лишь в случае „плоской задачи“ (отсутствии поперечных деформаций). Поэтому в нашей работе мы остановились на металлографическом методе исследования, причем для выявления структуры применили травление по методу Fгу, что дало возможность, кроме основной структуры, получить точную картину пластических деформаций в любом сечении образца.

Метод Fгу, появившийся в литературе в 1921 г.¹⁸⁾, в последующие годы был подвергнут строгой проверке путем целого ряда работ, при чем были найдены наилучшие условия его применения и использования. Сущность его заключается в следующем:

Пластически деформированный образец отжигается в течении 30 мин. при температуре 200° С.,¹⁹⁾ после чего разрезается в интересующем месте, шлифуется до шкурки № 00000 и, наконец, травится реактивом следующего состава (в случае макро-шлифа):

Воды — 100 см.³
 крепкой сол. кисл. — 120 см.³
 хлорной меди (Cu Cl_2) — 90 гр.

Травление продолжается от 0,5 до нескольких минут, после чего остатки реактива со шлива смываются соляной кислотой²⁰⁾ (во избежания осаждения на нем меди); шлиф обмывается водой и обсушивается. Часто для большей ясности картины описанное травление сменяется осторожной шлифовкой окисью алюминия на суконном диске с повторением травления после шлифовки, и так несколько раз.

Получасовой отжиг при $t = 200^\circ \text{C}$. служит для выявления при последующем травлении деформированной зоны, и без него травление указанным реактивом оказывается недействительным; за исключением того случая, когда деформация происходила при температуре $150^\circ - 300^\circ$. Благодаря необходимости отжига, все, что происходит после него, не выявляется на шлифе, так что разрезание образца после отжига или даже обстрагивание его на станке, опиливание и шлифовка его не отражаются в выявляемой травлением картине, хотя и производят некоторые пластические формоизменения в теле образца. Таким образом является возможным исключить влияние всех, неизбежных при приготовлении шлифа, деформаций на окончательную картину.

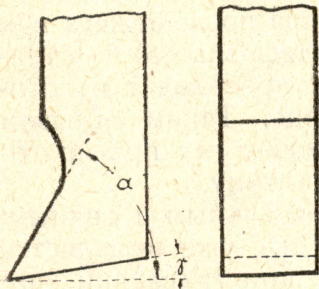
Описанный метод является достаточно чувствительным и точным; деформация в 0,5% (вычисленная на длине 10 м/м.), уже выявляется на шлифе²⁰⁾. К сожалению, не все металлы дают при травлении картину деформаций. Высказано предположение, подтвержденное соответствующими опытами, что все железные металлы с пространственно-центрированной решеткой, обладающие большой вязкостью и резким падением кривой в диаграмме растяжения после предела упругости, дают положительные результаты при травлении²¹⁾.

Материалом для наших опытов было взято мягкое, малоуглеродистое полосовое железо (см. фиг. № 1), дающее при травлении по описанному методу ясную картину. Из него были приготовлены образцы размерами $180 \times 50 \times 6$ м/м. и частью размерами $210 \times 50 \times 6$ м/м. Опыты велись главным образом, на строгальном станках. Для этого был использован частью большой строгальный станок с отдельным мотором, частью малый строгальный станок с приводом от трансмиссии. Часть опытов велась и на токарных станках.

Предварительная обработка образцов заключалась в следующем. Посредине, вдоль каждого образца, на равных расстояниях сверлились три отверстия диаметром $\frac{7}{16}$ ", которые служили для закрепления образцов на столе строгального станка. Затем все образцы при помощи болтов, пропущенных через просверленные дыры, зажимались между двумя кусками углового железа таким образом, что края образцов превышали вертикальные полки углового железа примерно на 10 м/м. Куски углового железа, с зажатыми между ними образцами, прижимались за горизонтальные полки к столу строгального станка. Таким образом достигалось прочное крепление, которое давало возможность снимать стружку значительных размеров. Установленные так образцы предварительно прострагивались для получения поверхности параллельной плоскости стола, после этого снимались со станка и подвергались отжигу, целью которого являлась нормализация материала и устранение напряжений и деформаций, как бывших ранее в железе, так и возникнувших при изготовлении образцов. Для этого все образцы закладывались в отре-

зок железной трубы, засыпались окалиной и плотно замазывались огнеупорной глиной. Все это предохраняло железо при последующем отжиге от окисления. Отжиг производился в тигельном горне. Труба с замурованными образцами нагревалась в течении $2\frac{1}{2}$ —3 часов до температуры 950° — 1000° , после чего медленно остывала вместе с горном до комнатной температуры в течении 12—15 часов. В результате такого отжига все образцы получили однообразную, довольно равномерную структуру (см. фиг. № 1) и давали полную гарантию отсутствия каких-либо предварительных напряжений. На поверхности образцов получился лишь очень тонкий слой окалины.

После отжига стороны образцов, предназначенные для снятия стружки, опиливались личной пилой под линейку, а для снятия очень тонких стружек шлифовались наждачной бумагой, чем и заканчивалась предварительная подготовка.



Черт. № 4.

Резцы при опытах употреблялись из быстрорежущей стали с теоретическим профилем, прямолинейным лезвием и плоской передней гранью, с углами резавья α (см. черт. № 4) 45° , 55° , 65° , 75° , 85° . Угол задней заточки у всех резцов был $\gamma = 8^{\circ}$ — 10° . Углы резанья проверялись при каждой установке резца помощью угломера с точностью до 1° .

Для опыта каждый образец зажимался между полосами углового железа и закреплялся на столе строгального станка так, что одна из предварительно опилённых кромок образца длиной 180 м/м. и шириною 6 м/м. оказывалась параллельной плоскости стола и предназначалась для снятия стружки. Точно проверялась параллельность установки образца направлению движения стола (или, что тоже, резца). Затем устанавливался резец таким образом, что его лезвие (кромка) было строго горизонтально и точно находилось против установленного образца. Длина лезвия резца была всегда больше чем толщина образца и резец мог потому снимать стружку шириной равной толщине образца (6,20 м/м.), причем, ввиду того, что лезвие устанавливалось горизонтально, толщина стружки была одинакова по всей ее ширине. Глубина резанья для этого случая равнялась толщине снимаемого слоя. Таким путем мы осуществляли более упрощенный, в сравнении с обычным, процесс отделения стружки так же, как это было сделано проф. Зворыкиным, Соколовым и друг. После установки резца проверялся угломером угол резанья и устанавливалась желаемая толщина снимаемого слоя (глубина резанья). Полученная в результате опыта действительная толщина снимаемого слоя, обычно всегда отличалась от установленной, так как, несмотря на мощность конструкции станка, массивность резцов и прочность закрепления их и обрабатываемого предмета, не удается избежать некоторых упругих деформаций во всей системе. Действительная толщина стружки измерялась впоследствии, как это будет своевременно указано.

После указанных предварительных операций, станок пускался в ход и резец снимал стружку. Длина хода обыкновенно бывала 80—120 м/м., после чего или стол выключением мотора внезапно останавливался, или получал, путем соответствующей установки кулачков, перекидывающих ремень, перемену направления движения. И в том и в другом случае снятая стружка оставалась соединенной с основным

телом образца. После этого образец снимался со стола станка и устанавливался следующий. Тонкие стружки снимались на малом станке с приводом от трансмиссии, толстые на большом. И тот и другой давали скорость резанья около 8 метров в минуту. С каждой стороны (180×6 м/м.) образца снималась лишь одна стружка, т. к. считалось, что поверхность, с которой снята уже стружка, претерпела некоторые пластические деформации, а потому по своим механическим свойствам несколько отлична от основного материала и не годится для следующего опыта.

Образец со снятой стружкой подвергался обмеру. Измерялась длина прохода резца l_0 и длина полученной стружки l_1 (с точностью до 0,5 м/м.), это служило в дальнейшем для вычисления коэффициента продольной усадки ($K_0 = \frac{l_1}{l_0}$). Длина стружки измерялась гибкой нитью и всегда по стороне, прилегающей к резцу (т.е. по внешней). После обмера стружка вместе с прилегающей частью материала отрезалась ножовкой и подвергалась получасовому отжигу при температуре 200°C ., для чего малые стружки помещались в кипящую нафталиновую ванну ($t = 2.8^\circ \text{C}$), большие же отжигались в электрической печи сопротивления с железной обмоткой, типа „Hereys“. После отжига образец со стружкой разрезался вдоль, шлифовался и травился, согласно указанному порядку. При продольном разрезании образцов с тонкими стружками можно было опасаться излома стружки. Для предотвращения этого, образец вместе с стружкой заправлялся в третник (температура плавления $160^\circ\text{--}180^\circ$), так что стружка со всех сторон охватывалась сплавом. Продольное разрезание производилось вместе со сплавом, затем производилось опилование и шлифовка на грубых сортах шкурки и только после этого шлиф освобождался от окружающего его сплава, для чего весь кусок опускался в расплавленную ванну того же сплава. Явились опасения, что нагревание образца при его освобождении от сплава повлечет выявление деформаций, произведенных в образце его разрезанием, однако опыт показал что, или ввиду незначительной продолжительности нагревания, или же ввиду незначительности деформаций, опасения не оправдались. Необходимо было также следить, чтобы температура сплава не превышала $200\text{--}220^\circ \text{C}$., что могло отрицательно повлиять на ясность картины. После этого определялась действительная толщина снимаемого слоя (глубина резанья), для чего шлиф помещался в проекционный микроскоп и на матовом стекле фото-камеры микроскопа при увеличении в 10—20 раз, являлась возможность произвести измерение с точностью до 0,025 м/м. Здесь же производились все другие, интересующие нас, измерения и в большинстве случаев шлиф фотографировался.

Наибольшее количество опытов было произведено для углов резанья $\alpha = 55^\circ$ и 65° .

Деформации в стружке.

1. Сливная стружка.

В порядке изложения прежде всего коснемся вопроса об усадке стружки. То обстоятельство, что снятая стружка получается короче, чем пройденный резцом путь, замечено было очень давно и рядом опытов (первые были произведены проф. Тиме) было установлено, что ко-

коэффициент продольной усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$ вообще говоря, изменяется с изменением качества материала, угла резанья и толщины стружки и всегда меньше единицы; но все же, несмотря на видимую простоту явления и на легкость его исследования, не касаясь внутреннего механизма явления усадки, до сих пор нет единого мнения о зависимостях коэффициента усадки от вышеупомянутых факторов.

По мнению Тиме коэффициент продольной усадки уменьшается (т.е. усадка увеличивается) с увеличением угла резанья, при постоянстве же угла резанья он изменяется чрезвычайно незначительно, несколько увеличиваясь с увеличением сечения стружки. Так для железа и для $\alpha = 45^\circ$ он колеблется в пределах $K_0 = 0,59 - 0,65$.

Опыты Соколова⁷⁾, согласуясь с этим, говорят, кроме того, что чем больше вязкость обрабатываемого материала, тем меньше коэффициент продольной усадки.

Заднепровский⁹⁾ устанавливает возрастание коэффициента усадки с увеличением сечения стружки (для свинца).

В распространенной же книге проф. Саввина²²⁾ мы находим: „Усадка стружки тем больше (т.е. коэффициент усадки тем меньше), чем вязче материал, больше угол резанья и толще снимаемый слой“. Последнее положение, как видим, прямо противоположно тем, которые приведены выше.

С целью выяснения зависимости коэффициента продольной усадки от всех приведенных выше причин, нами производились обмеры почти всех снимаемых стружек, предназначенных для приготовления шлифов и травления. Кроме того были произведены дополнительные опыты, целью которых являлось установление зависимости коэффициента продольной усадки от глубины резанья (толщины снимаемого слоя „ δ “) при всех углах резанья. В этих опытах снимались стружки различной толщины, начиная от 0,03 м/м. Для того, чтобы исключить влияние переменной толщины стружки при начале и конце резанья, т.к. в первом случае резец идет углубляясь в материал, во втором же обыкновенно отрывает лишние кусочки материала,—отступая на 10 м/м. от краев образца делались прорезы ножовкой, которые ограничивали стружку одинаковой толщины. Естественно, при вычислении коэффициента усадки за длину хода резца (l_0) принималась длина между прорезами. Ввиду того, что при очень тонких стружках, непосредственное измерение толщины стружки могло дать значительные ошибки, толщина определялась методом взвешивания полученной стружки. Вес определялся на аналитических весах с точностью до 0,005 грамма. Определив вес каждой стружки, определив также заранее удельный вес железа можно было найти объем материала, заключенного в стружку, зная же длину прохода резца (длину между прорезами ножовкой) и ширину образца, нетрудно было вычислением получить точную величину толщины снимаемого слоя (глубины резанья). Удельный вес железа нами был получен как среднее из нескольких взвешиваний равным 7,85, причем в пределах двух знаков после запятой не получалось разницы между удельным весом основного материала и удельным весом стружки. Для некоторых случаев измерялась, кроме указанного, ширина полученной стружки. Результаты произведенных измерений для угла резанья $\alpha = 45^\circ$ приведены в таблице № 4, для угла $\alpha = 55^\circ$ — в таблице № 5, и для $\alpha = 65^\circ$ в таблице № 6. При углах 75° и 85° мы,

как правило, не получали целой стружки, она обыкновенно была разделена на отдельные элементы, что препятствовало измерению длины стружки.

Таблица № 4.

Усадка стружки при $\alpha = 45^\circ$.

№№ по пор.	№ образца	Толщина снимаем. слоя в м/м. "δ"	Длина прохода резца м/м. l_0	Длина снятой стружки м/м. l_1	Коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Ширина до снятия стружки м/м. b_0	Ширина снятой стружки м/м. b_1	ПРИМЕЧАНИЕ
1	46	0,07	80,0	40	0,50	6,2	6,2	Глубина резанья (толщина снимаемого слоя) определена методом взвешивания.
2	40	0,08	"	41,5	0,52	"	6,2	
3	47	0,13	"	41,5	0,52	"	6,22	
4	42	0,16	"	43,5	0,54	"	6,22	
5	41	0,18	"	43,0	0,54	"	6,24	
6	45	0,20	"	46,0	0,57	"	6,24	
7	43	0,29	"	45,0	0,56	"	6,3	
8	44	0,52	"	47,0	0,59	"	6,4	
9	77	0,5	"	41,0	0,51	"	—	
10	74	0,35	87,0	46,0	0,53	"	—	
11	73	0,8	46,0	27,0	0,58	"	—	
12	103	1,0	136,0	83,0	0,61	"	—	
13	35	1,2	98,0	49,5	0,51	"	—	
14	101	1,6	140,0	91,0	0,65	"	—	
15	106	1,75	99,0	67,0	0,68	"	—	
16	104	1,85	122,0	89,0	0,73	"	—	
17	105	2,2	126,0	92,0	0,73	"	—	
18	107	4,0	66,0	46,0	0,70	"	—	

Таблица № 5.

Усадка стружки при $\alpha = 55^\circ$.

№№ по пор.	образца. №	Толщина снимаем. слоя м/м. „ δ “	Длина прохода реза м/м. l_0	Длина снятой стружки l_1	Коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Ширина до снятия стружки b_0	Ширина снятой стружки b_1	ПРИМЕЧАНИЕ
1	13	0,03	194	67	0,35	6,2	6,22	Толщина снимаемого слоя „ δ “ определена методом взвешивания.
2	20	0,04	„	73,5	0,38	„	6,3	
3	14	0,07	„	78,5	0,40	„	6,34	
4	30	0,08	„	79,5	0,41	„	6,35	
5	146	0,13	123	55,0	0,45	„	—	
6	29	0,16	88	40	0,45	„	6,45	Толщина снимаемого слоя „ δ “ определена методом взвешивания.
7	15	0,2	194	93	0,48	„	6,4	
8	28	0,31	88	40	0,45	„	6,5	
9	23	0,44	194	93	0,48	„	—	
10	12	0,45	„	90	0,47	„	6,7	
11	22	0,70	88	47	0,54	„	6,9	
12	148	0,25	37,5	16,5	0,44	„	6,25	
13	147	0,30	46,0	21,5	0,47	„	6,4	
14	151	0,60	52	24	0,46	„	6,47	
15	149	0,78	46	22	0,48	„	6,62	
16	26	1,1	124	66,5	0,54	„	—	
17	25	1,35	142	83,5	0,59	„	—	
18	21	1,45	156	87,0	0,56	„	—	
19	24	1,8	143	82,5	0,58	„	—	
20	108	2,0	71	40	0,56	„	—	
21	20	2,0	100	53	0,53	„	—	
22	1	2,1	109,5	58,5	0,54	„	—	
23	19	2,3	120	72	0,6	„	—	
24	166	2,5	101	67,5	0,67	„	—	
25	2	2,6	78	47,5	0,61	„	—	
26	109	2,65	139	80	0,58	„	—	Второй слой.
27	3	3,2	102,5	67,5	0,66	„	—	
28	23	4,1	65	44	0,68	„	—	
29	79	0,4	92	43	0,47	„	—	

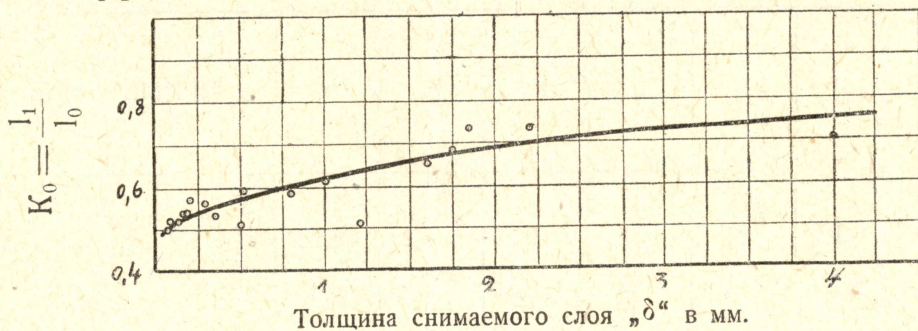
Таблица № 6.
Усадка при $\alpha = 65^\circ$.

№№ по пор.	№ образцов	„ δ “	l_0	l_1	K_0	b_0	b_1	ПРИМЕЧАНИЕ
1	48	0,1	99	35	0,35	6,2	6,23	
2	52	0,1	„	33	0,33	„	6,3	
3	53	0,1	„	26	0,26	„	6,21	Делится на элементы.
4	51	0,11	„	30	0,3	„	6,3	
5	50	0,2	„	32	0,32	„	6,75	
6	49	0,3	„	26	0,26	„	6,5—7,5	Делится на элементы.
7	154	0,2	71,5	27,0	0,38	„	6,40	
8	156	0,4	70,5	21,5	0,30	„	7,25	Делится на элементы.
9	75	0,5	45	15	0,33	„	—	
10	157	0,5	68	15,5	0,23	„	6,9	Делится на элементы.
11	155	0,55	37,5	12,5	0,32	„	7,35	„ „ „
12	158	0,55	73,5	21,5	0,29	„	7,2	„ „ „
13	38	0,6	156	42	0,27	„	—	„ „ „
14	110	1,6	123	49	0,40	„	—	
15	13	1,85	111	51	0,46	„	—	
16	111	2,1	112	57	0,51	„	—	
17	18	2,15	113,5	59	0,52	„	—	
18	114	2,7	90	58	0,64	„	—	
19	115	3,7	93	73	0,78	„	—	
20	17	4,3	66	41	0,62	„	—	
21	90	0,95	60	24	0,40	„	—	

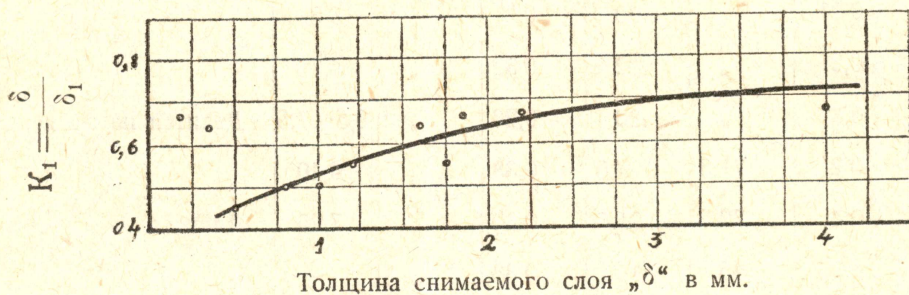
Примечание: У № 1, 2, 3, 4, 5, 6 „ δ “ определено методом взвешивания.

По данным таблицы № 4 был построен график черт. № 5, где на оси ординат нанесен коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$, на оси абсцисс толщина снимаемого слоя (глубина резанья) „ δ “ в миллиметрах. Точно таким же образом по таблице № 5 построен график черт. № 9, для $\alpha = 55^\circ$, по данным таблицы № 6—график черт. 13, для $\alpha = 65^\circ$.

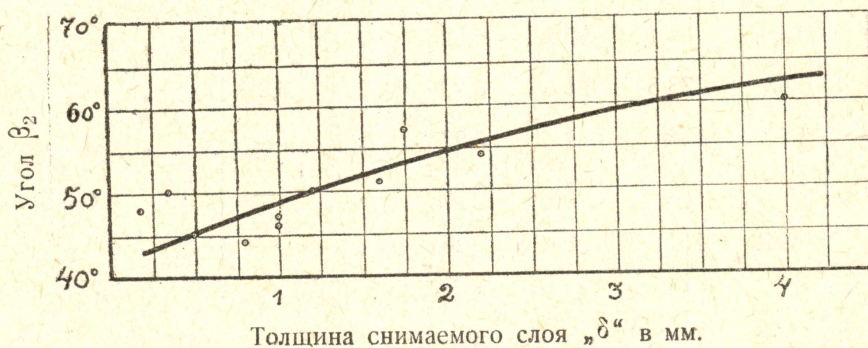
Из рассмотрения таблиц и соответствующих им графиков можно прежде, всего, усмотреть вполне определенную тенденцию к повышению коэффициента усадки с увеличением толщины снимаемого слоя.



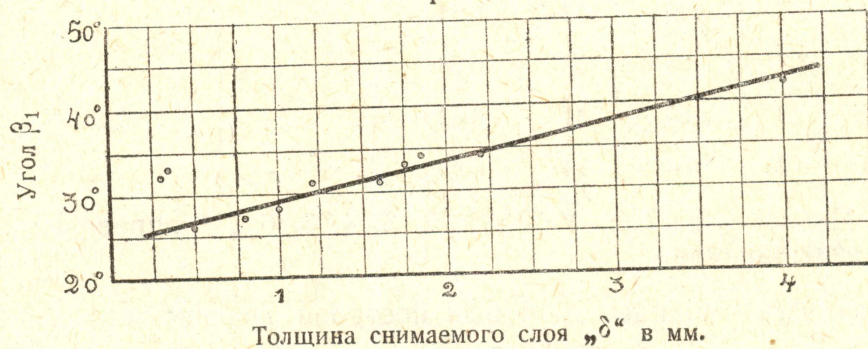
Черт. № 5.



Черт. № 6.



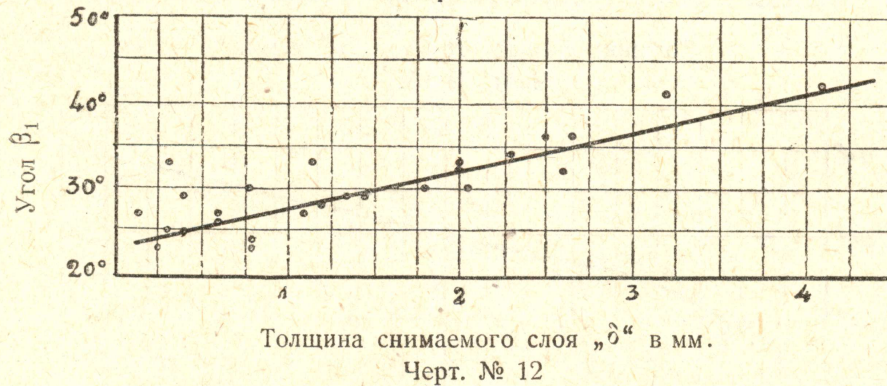
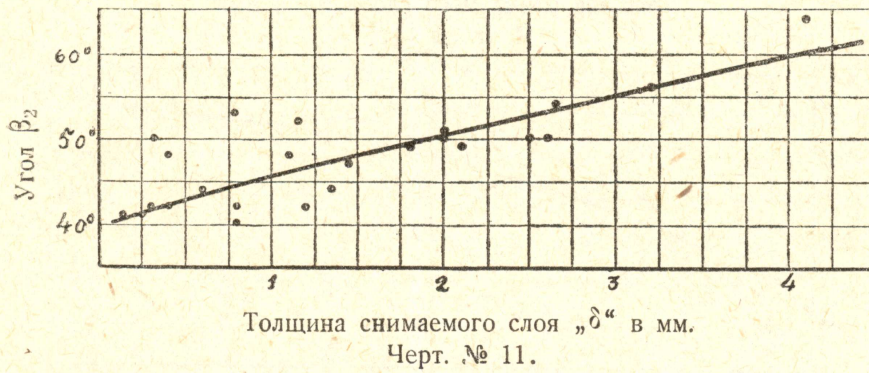
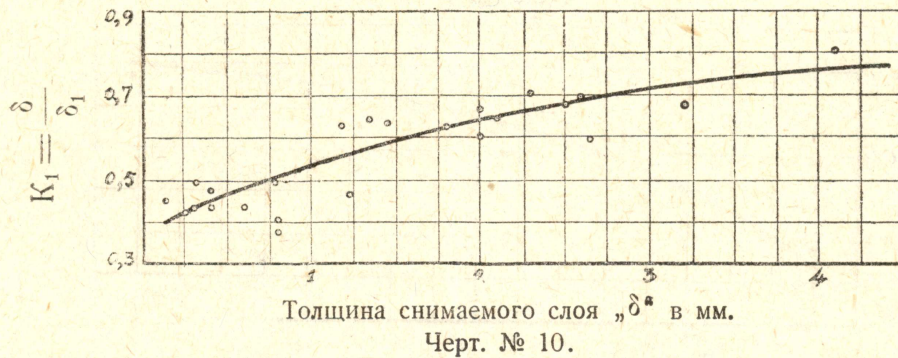
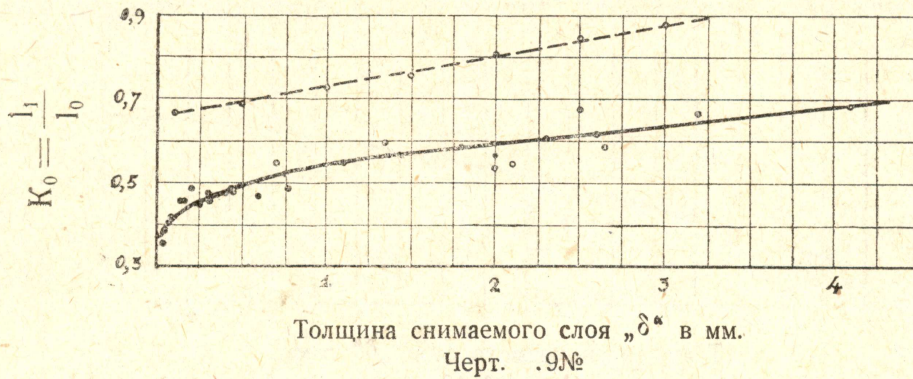
Черт. № 7.



Черт. № 8.

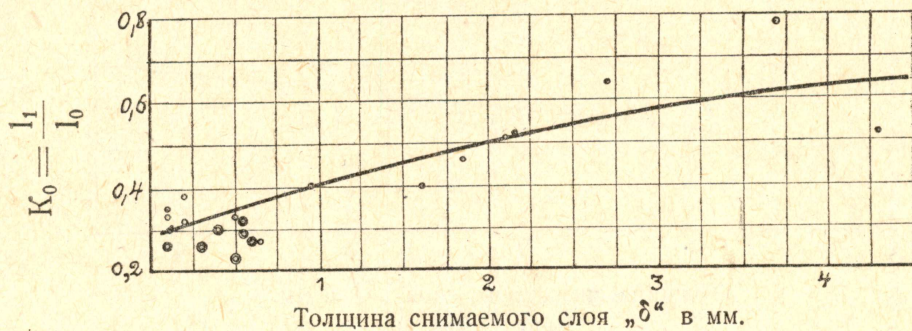
Повышение коэффициента усадки вполне ясно выражено графиками и для малых величин „ δ “ идет быстрее, чем для больших. При угле резанья $\alpha = 65^\circ$ мы видим некоторое колебание значений коэффициента

усадки для малых величин „ δ “. Это колебание нетрудно объяснить тем, что при $\alpha = 65^\circ$ некоторые тонкие стружки у нас получались, состоящими из связанных между собой элементов (суставчиков); такие стружки

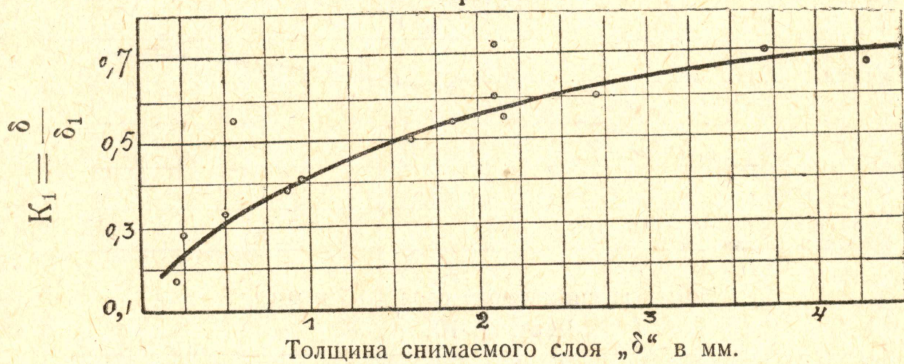


имели очень большую усадку, очень малую величину K_0 . Другая же часть тонких стружек имела вполне сливное строение и коэффициенты усадки для них имели более высокое значение.

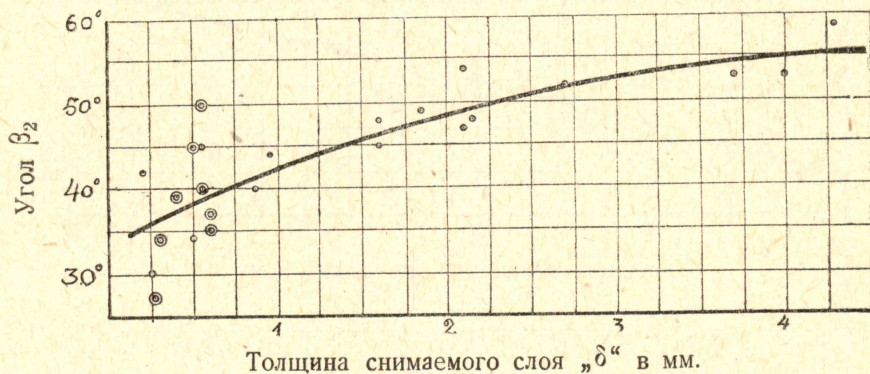
Можно констатировать ошибку проф. Саввина²²⁾, полагающего, что усадка увеличивается с увеличением толщины снимаемого слоя. Мы видим зависимость совершенно обратного характера. При этом коэффициент усадки изменяется в гораздо более широких пределах, чем



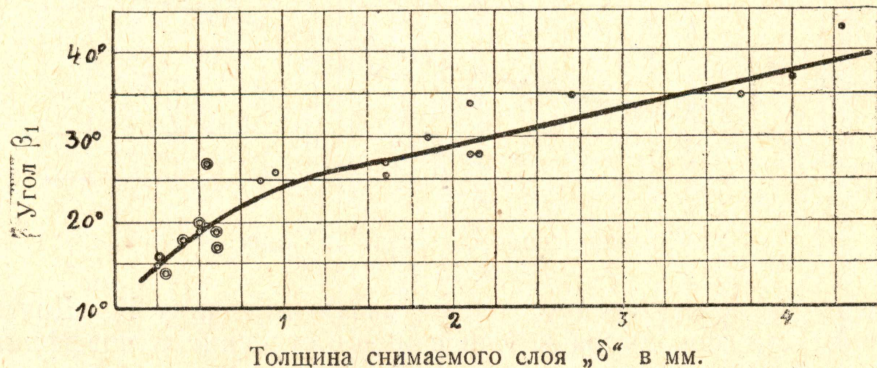
Черт. № 13.



Черт. № 14.



Черт. № 15.



Черт. № 16.

это предполагал проф. Тиме для железа и это особенно заметно при $\alpha = 65^\circ$, где K° колеблется от 0,23 до 0,78. При $\alpha = 55^\circ$ имеем колебание от 0,35 до 0,68, при $\alpha = 45^\circ$ от 0,5 до 0,73.

Из сравнения графиков между собой видно, что с увеличением угла резанья коэффициент усадки падает и притом довольно значительно, особенно при малых значениях „ δ “.

В дальнейшем нам придется еще вернуться к явлению усадки стружки и там мы приведем некоторые дополнительные опыты в этом отношении и попытаемся вывести некоторые заключения, сейчас же переходим к изучению строения стружки.

Для этой цели описанным уже методом были приготовлены шлифы со всех стружек, за исключением тех, которые служили для вычисления усадки—методом взвешивания. При травлении шлифов методом Fry, прежде всего обращает внимание то обстоятельство, что процесс травления резко разбивается на две стадии. В течении первого времени протяжением до 1—1½ мин. травящий реактив выявляет макро-структуру образца, причем резко отделяет область сильно деформированной стружки от остального, сравнительно со стружкой меньше деформированного металла образца. Если на этом прекратить процесс травления, то мы можем получить наглядное представление о строении стружки, судить о границе перехода металла в стружку и о деформациях происходящих в этой последней. Прерванное таким образом травление не дает никаких указаний на происшедшие в основной массе металла деформации. Здесь лишь наблюдается некоторое равномерное потемнение шлифа с выявлением макроструктуры, включений, светловин и так дал. Если продолжить травление дальше, то через некоторое время, иногда довольно продолжительное, выявляется деформированная область в основной массе металла. Но при этом металл стружки настолько сильно перетравливается, что представляет собой очень темное равномерно-окрашенное поле, с отсутствием каких либо подробностей, дающих возможность сделать те или иные заключения.

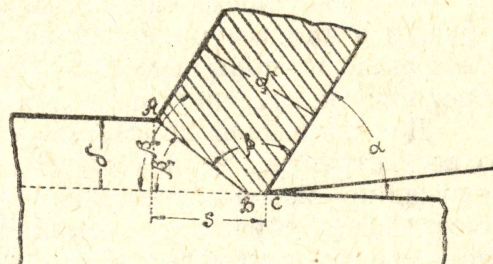
На основании этих причин нам пришлось для всех шлифов прекратить процесс травления в первой стадии, сделать необходимые наблюдения, измерения и фотографии, а затем, продолжая травление и, проделав таким образом вторую стадию процесса, получать картину деформации основного металла.

Рассмотрим результаты первой стадии травления. Для стружек, снимаемых резцами с углами резанья $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 55^\circ$ не получалось никакой качественной разницы в полученных картинах, при дальнейшем же увеличении угла резанья возникали те или иные изменения; поэтому мы начнем с угла $\alpha = 55^\circ$, рассмотрев заодно с ним и случаи резанья при $\alpha = 45^\circ$, затем перейдем к бóльшим углам.

При рассмотрении фотографий (см. фиг. № 2, 3, 4 и 5), относящихся к углу резанья $\alpha = 55^\circ$ и расположенных в порядке увеличения толщины снимаемого слоя (глубины резанья), бросается в глаза резкая граница между стружкой и основным металлом. Граница эта для тонких стружек почти точно прямолинейная, переходит при толстых стружках в ломанную, состоящую из двух прямых, линию, одна из которых идет от кончика резца в направлении его движения, другая под некоторым углом пересекает первую и ее ограничивает. В тонких стружках граница видна яснее и легче выявляется при травлении, чем в толстых, где ее выявить удастся лишь после нескольких чередующихся шлифовок и травлений, причем не исключена возможность перетравить

и окончательно потерять ясность изображения. Схематическое представление этих границ нами дано прямыми ABC на чертеже (17), где проставлены и другие обозначения, необходимые нам в дальнейшем.

Затем очень ясно видно, что стружка вся как-бы делится на тонкие, частые, параллельные между собой слои, распространяющиеся почти через всю толщину стружки и наклоненные под некоторым углом к прямолинейной границе между стружкой и основным металлом. Не трудно заметить, что граница стружки является геометрическим местом конечных точек этих слоев и ими собственно образуется. При большом увеличении (в 100—150 раз) можно различить, что слои состоят из чрезвычайно сильно деформированных зерен металла, вытянутых в направлении слоя, потому не представляет сомнения что направление слоев дают нам направление скольжения зерен металла в процессе образования стружки.



Черт. № 17.

Таким образом процесс образования стружки представляет собой в данном случае последовательные сдвиги металла в направлении угла β_2 (черт. 17). Из рассмотрения фиг. № 3 и 4 можно заключить, что линии сдвигов внутри стружки возникают в месте перехода обрабатываемой поверхности в стружку, (точка A, черт. № 17) и распространяются в направлении обратном движению резца и под углом β_2 к нему. Границей распространения их является сторона угла β_1 . Затем видно, что у поверхности резца линии сдвигов теряют свой прямолинейный характер, изгибаясь в направлении обратном движению стружки по резцу и в пределе принимая иногда направление параллельное передней грани резца; в тонких стружках загибание слоев не всегда заметно, в случае же большой толщины оно всегда имеется налицо. Особенно ясно это явление заметно на фиг. № 6. Из этой же фотографии, также как и из других видно, что поверхность стружки, обращенная к резцу, не является ровной и гладкой, но покрыта значительными зазубринами, направленными своими острыми концами в сторону движения стружки по резцу. В случае малой толщины слоя иногда наблюдается почти полное отсутствие зазубрин, но большей частью хоть в зачаточном состоянии, но все же можно их обнаружить (фиг. № 2).

На поверхности, с которой уже снята стружка (будем в дальнейшем называть ее подрезцовой поверхностью), мы имеем также присутствие зазубрин, обращенных остриями в сторону обратную движению резца (см. фиг. № 3, 4 и 6); они похожи на те, которые находятся на стружке, но имеют более правильную однообразную форму и расположены почти на одинаковых расстояниях друг от друга.

Фотографии (см. фиг. № 7, 8, 9, 10, 11) дают представление о процессе при угле резанья $\alpha = 65^\circ$ и различных величинах „ δ “. При малых „ δ “ мы получали при этом либо стружки состоящие из отдельных элементов (фиг. 7 и 8), либо соединенных вместе, но представляющие ясно суставчатое строение; нередко бывали случаи и совершенно сливных стружек. При увеличении толщины снимаемого слоя, стружка принимает определенно сливное строение (фиг. № 9, 10 и 11). Во всех этих случаях мы опять ясно различаем и границу отделяющую стружку от основного тела образца, и направления сдвигов в самой стружке;

как и при меньших углах резанья, здесь сдвиги в стружке теряют при приближении к плоскости реза свой прямолинейный характер и загибаются в сторону, обратную движению стружки по резцу (фиг. № 9); на стороне стружки прилегающей к резцу и на подрезцовой поверхности имеем также наличие зазубрин, которые здесь особенно ярко выражены и при больших толщинах снимаемого слоя имеют иногда очень значительную величину.

Таким образом в основном нет никакой разницы с тем, что мы имели ранее, за исключением того, что тонкие стружки делятся иногда на отдельные элементы, и черт. № 17 точно также пригоден для схематического изображения процесса. Из рассмотрения фотографии фиг. № 7 и 8 можно заключить, что разделение стружки на элементы происходит большей части отнюдь не в направлении линий сдвига (угол β_2), скорей можно предположить, что граница элемента образуется по направлению стороны угла β_1 и отделение элемента происходит по линии ограничивающей стружку. Из фиг. № 7 видно, что линии сдвигов в отделившихся уже элементах делают весьма заметный угол с линиями раздела элементов. Более подробно на стружке, состоящей из отдельных элементов, остановимся в дальнейшем.

Схема процесса образования стружки была дана проф. Тиме и послужила основанием для последующих работ в этой области. Зворыкин, Афанасьев, Погоржельский и другие, базируясь на его выводах старались и результаты своих работ так или иначе согласовать и связать с ними. Усачев, наблюдая случаи излома стружки, внес некоторые изменения в теорию проф. Тиме, однако нужно сказать, это не получило отражения в более поздних работах, несмотря на свою основательность. Многие теоретические исследования и попытки аналитической разработки вопроса образования стружки всецело основаны на безоговорочном принятии теории Тиме за достоверную и даже в самых новейших и достаточно обширных экспериментальных и теоретических работах мы встречаем на нее ссылки ^{10), 16), 23), 24)}.

Тиме предполагал, что в случае резанья вязкого материала все стружки, независимо от угла резанья и материала, обязаны своим образованием процессу последовательного скалывания металла, в вполне определенном для каждого угла резанья строго постоянном, направлении. Скалывание распространяется при этом прямолинейно от кончика реза, к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку (точка А черт. № 17) и очередная линия скалывания представляет собой границу распространения деформаций в образце.

Из рассмотрения наших фотографий мы сделали иные выводы. Разбирая пока лишь случай сливной стружки, можно сказать, что представление Тиме далеко не соответствует действительности. Никакого скола в направлении от кончика реза к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку мы не имеем. В этом направлении лишь имеется граница распространения деформаций в стружке, но и она прямолинейный характер имеет лишь при тонких стружках, превращаясь при более значительных величинах „ δ “ в ломанную линию. Линии сдвигов, образующие стружку всегда направлены под некоторым углом к упомянутой границе, никогда не совпадая с ней и распространяются не от реза вперед, а наоборот назад к резцу, возникая у точки перехода обрабатываемой поверхности в стружку; при этом скольжение происходит одновременно в многих плоскостях.

При рассмотрении полученных шлифов мы заинтересовались величиной β_1 и β_2 (черт. № 17), углов наклона границы деформаций в стружке и направлений линий сдвигов к линии движения резца. Имеющиеся по этим вопросам исследования, отождествляя согласно выводам Тиме оба угла, приходят к заключению, что угол сдвига $\beta_1 = \beta_2$ строго постоянен для каждого угла резанья и при изменении угла резанья колеблется в очень узких пределах, уменьшаясь с увеличением последнего. Исключением является мнение Hankins'a ^{24, 25}), еще более упрощающего вопрос утверждением, что вообще для всех материалов и всех углов резанья $\beta_1 = \beta_2 = 26^\circ = \text{const}$. Наконец, Rosenhain и Stygney ¹²) предполагают, что $\beta_1 = 30^\circ$, в случае обработки стали и латуни.

Мы произвели измерение интересующих нас углов, при этом пользовались следующим способом. На увеличенное в 10—20 раз изображение шлифа на матовом стекле фото-камеры проекционного микроскопа накладывался лист очень прозрачной стеклянной бумаги, на которой был нанесен угол в 90° , разделенный на отдельные градусные деления. Таким образом оценивалась величина углов β_1 и β_2 , что возможно было сделать при тщательно протравленном шлифе с точностью до 2° . Полученные результаты собраны в таблицах; для угла резанья $\alpha = 45^\circ$ таблица № 7, для $\alpha = 55^\circ$, таблица № 8 и для $\alpha = 65^\circ$ таблица № 9. В этих же таблицах помещены некоторые необходимые нам в дальнейшем, полученные измерением, величины: s — расстояние по горизонтали в м/м от кончика резца до точки перехода обрабатываемой поверхности в стружку (см. черт. № 17); δ_1 — толщина снятой стружки; h — высота зазубрин на подрезочной поверхности, s_1 — среднее расстояние между зазубринами. Кроме этих величин нами в эти же таблицы помещено вычисленное значение коэффициента $k_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$, который является таким образом величиной обратной коэффициенту утолщения стружки и будет всегда меньше единицы, так как снятая стружка вследствие продольной усадки испытывает поперечное утолщение и оказывается толще снимаемого слоя: $\delta_1 > \delta$; $\frac{\delta}{\delta_1} < 1$.

Здесь же нами помещены для сравнения коэффициенты продольной усадки k° , полученные ранее.

Таблица № 7. $\alpha = 45^\circ$.

№№ по пор.	№ образца	δ м/м.	δ_1 м/м.	S м/м.	$\frac{h}{S_1}$	β_1	β_2	$\frac{\delta}{\delta_1}$ K_1	$\frac{l_1}{l_0}$ K_0	Примечание:
1	76	0,18	0,27	0,35	—	32°	48°	0,67	—	
2	74	0,35	0,6	1,2	—	$32^\circ - 34^\circ$	50°	0,64	0,65	
3	77	0,5	1,1	2	$\frac{0,1}{0,5}$	26°	45°	0,45	0,51	
4	73	0,8	1,6	3	$\frac{0,1}{0,5}$	$26^\circ - 28^\circ$	44°	0,5	0,58	
5	36	1,0	—	2,8	—	28°	46°	—	0,48	

№№ по пор.	№ образца	δ м/м.	δ_1 м/м.	S м/м.	$\frac{h}{S_1}$	β_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Примечание
6	103	1,0	2,0	3,5	$\frac{0,1}{0,7}$	28°	46°—48°	0,5	0,61	
7	35	1,2	2,2	3,6	$\frac{0,15}{0,7}$	31°	50°	0,55	0,6	
8	101	1,6	2,5	3,7	$\frac{0,12}{0,8}$	30°—32°	50°—52°	0,64	0,65	
9	106	1,75	3,2	5,5	$\frac{0,18}{1,2}$	32°—34°	56°—58°	0,55	0,68	
10	104	1,85	2,8	4,0	$\frac{0,1}{0,6}$	34°	—	0,66	0,73	
11	105	2,2	3,3	5,5	$\frac{0,15}{0,8}$	34°	54°	0,67	0,73	
12	107	4,0	6	11	$\frac{0,2}{0,8}$	42°	60°	0,67	0,70	

Таблица № 8; $\alpha = 55^\circ$.

№ по пор.	№ образца	" δ "	" δ_1 "	"S"	$\frac{h}{S_1}$	β_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Примечание
1	146	0,13	0,29	0,4	—	26°—28°	40°—42°	0,45	0,45	Стружка второ- го, слоя.
2	148	0,25	0,6	0,9	$\frac{0,1}{0,8}$	22°—24°	40°—42°	0,42	0,44	
3	147	0,3	0,7	1,0	—	24°—26°	42°	0,43	0,47	β_2 не совсем ясен.
4	71	0,32	0,65	1,0	—	32°—34°	50°	0,49	—	
5	9	0,4	0,95	1,3	—	24°—26°	42°	0,43	—	
6	79	0,4	—	2,0	—	28°—30°	48°	0,47	—	
7	150	0,6	1,4	1,9	$\frac{0,1}{0,8}$	26°	44°	0,43	—	
8	151	0,6	1,4	1,8	$\frac{0,1}{0,7}$	26°—28°	44°	0,43	0,46	
9	149	0,78	1,6	2,5	$\frac{0,15}{1,0}$	30°	52°—54°	0,49	0,48	Большие значе- ния β_1 и β_2 об- ясняются ненор- мальным стро- ением стружки.
10	153	0,8	2,0	2,8	$\frac{0,2}{1,2}$	24°	42°	0,4	—	
11	97	0,8	2,15	2,9	$\frac{0,2}{1,3}$	22°—24°	40°	0,37	—	
12	26	1,1	—	3,0	—	26°—28°	48°	—	0,53	
13	86	1,15	1,8	3,2	$\frac{0,1}{0,7}$	30°—32°	52°	0,63	—	

№ по пор.	№ образца	„ δ “	„ δ_1 “	„S“	$\frac{h}{s_1}$	δ_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Примечание	
14	4	1,2	2,6	2,9	—	28°	42°	0,46	—	Начало стружки	
15	25	1,35	2,1	3,6	$\frac{0,2}{1,2}$	28°—30°	44°	0,64	0,57		
16	21	1,45	2,3	3,8	$\frac{0,2}{1,2}$	28°—30°	46°—48°	0,63	0,56		
17	24	1,8	2,9	5,0	$\frac{0,3}{1,4}$	30°	48°—50°	0,62	0,57		
18	20	2,0	3,0	4,5	$\frac{0,25}{1,3}$	32°—34°	50°	0,66	0,53		
19	108	2,0	3,4	4,7	$\frac{0,2}{1,0}$	32°	50°—52°	0,6	0,56		
20	1	2,1	3,3	4,8	$\frac{0,15}{1,2}$	30°	48°—50°	0,64	0,53		
21	19	2,3	3,3	5,2	$\frac{0,25}{1,3}$	34°	—	0,7	0,6		Стружка второго слоя.
22	166	2,5	3,75	5,5	$\frac{0,4}{1,4}$	36°	50°	0,67	0,67		
23	2	2,6	3,75	5,8	—	32°	50°	0,69	0,61		Стружка второго слоя.
24	109	2,65	4,5	6,5	$\frac{0,25}{1,5}$	36°	54°	0,59	0,58		
25	3	3,2	4,6	5,5	$\frac{0,2}{1,2}$	40°—42°	56°	0,67	0,66		
26	23	4,1	5,12	10,8	$\frac{0,3}{1,5}$	42°	64°	0,8	0,68		

Таблица № 9; $\alpha = 65^\circ$.

№ по пор.	№ образца	„ δ “	„ δ_1 “	„S“	$\frac{h}{s_1}$	β_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_2}$	Примечание
1	154	0,2	0,55	1,2	$\frac{0,1}{0,7}$	—	42°	0,17	0,38	Делится на элементы.
2	118	0,25	0,9	1,4	$\frac{0,15}{1,5}$	14°—16°	30°	0,28	—	
3	87	0,26	—	1,8	—	16°	27°	—	—	
4	159	0,3	—	3,3	—	12°—16°	34°	—	—	
5	156	0,4	—	2	—	18°	38°—40°	—	—	
6	75	0,5	1,5	2,8	—	18°—20°	34°	0,33	0,33	
7	157	0,5	—	2,2	—	20°	44°—46°	—	0,23	
8	158	0,55	—	1,6	—	26°—28°	50°	—	0,29	

№ по пор. № образца	„ δ “	„ δ_1 “	„ s “	$\frac{h}{s_1}$	β_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_2}$	Примечание
9 164	0,55	1,0	1,7	$\frac{0,1}{1,5}$	26°—28°	44°—46°	0,55	—	
10 155	0,55	—	1,9	—	—	40°	—	0,32	„
11 38	0,6	—	3,5	—	18°—16°	34°—36°	—	0,27	„
12 67	0,6	—	3,8	—	18°—20°	36°—38°	—	—	„
13 69	0,87	2,3	3,5	—	24°—26°	40°	0,38	—	
14 90	0,95	2,3	2,9	—	26°	44°	0,41	0,40	
15 31	1,6	—	5,6	$\frac{0,4}{3,2}$	26°	44°—46°	—	—	
16 110	1,6	3,2	5,0	$\frac{0,4}{2}$	26°—28°	48°	0,5	0,4	
17 113	1,85	3,4	5,5	$\frac{0,5}{2,5}$	30°	48°—50°	0,54	0,46	Стружка сло- мана.
18 111	2,1	3,5	6,2	$\frac{0,7}{3}$	28°	46°—48°	0,6	0,51	β_2 не совсем ясно.
19 137	2,1	2,9	4,5	$\frac{0,3}{1,7}$	32°—36°	54°	0,72	—	
20 18	2,15	3,9	5,8	$\frac{0,5}{3}$	28°	48°	0,55	0,52	
21 114	2,7	4,5	6,5	$\frac{0,5}{2}$	34°—36°	52°	0,6	0,64	
22 115	3,7	5,3	9,0	$\frac{0,6}{2,2}$	34°—36°	52°—54°	0,7	0,78	
23 165	4,0	—	7,5	$\frac{0,15}{0,9}$	36°—38°	52°—54°	—	—	Начало стружки
24 17	4,3	6,4	9,0	$\frac{0,7}{2,5}$	42°	58°—60°	0,67	0,62	

В этих таблицах, как и в последующих помещены все без исключения полученные нами результаты измерения, каковы бы они ни были.

Для выяснения характера изменения величин K_1 , β_1 и β_2 с изменением „ δ “, построены графики: по данным таблицы № 7 черт. № 6—8; по таблице № 8 черт. 10—12 и по таблице № 9 черт. № 14—16.

Из приведенных таблиц (№ 7—9), так же как и из соответствующих им графиков явствует, что, с увеличением толщины снимаемого слоя, углы β_1 и β_2 неуклонно растут, при этом мы имеем очень значительную разницу между их наименьшими и наибольшими значениями. Чем больше величина угла резанья, тем меньше абсолютная величина углов β_1 и β_2 . Разность между этими углами примерно постоянна и приблизительно равна:

$$\beta_2 - \beta_1 = [18^\circ - 20^\circ].$$

Для того, чтобы убедиться в значительном возрастании углов β_1 и β_2 с увеличением „ δ “, нужно лишь сравнить между собой приведенные нами ранее фотографии фиг. № 2—5 и № 7—11. Для большей

наглядности они расположены в порядке увеличения толщины снимаемого слоя „ δ “ и для каждой из них составлена схема, на которой нанесены интересующие нас углы β_1 и β_2 (см. фиг. 2 а—5 а, 8 а—11 а). Фотографии ясно показывают возрастание углов с увеличением „ δ “.

Из таблиц № 7—9 видно, что с увеличением „ δ “ возрастает величина „ s “, но при этом вторая возрастает медленнее, чем первая и таким образом увеличивается отношение $\frac{\delta}{s}$. По схеме проф. Тиме (черт. 2)

$$\frac{\delta}{s} = \operatorname{tg} \beta_1.$$

Так что даже если принять схему черт. 2, то все же можно вывести заключение, что с увеличением толщины слоя, угол β_1 неизбежно должен увеличиваться. По нашей схеме (черт. 17)

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\delta}{s - BC}.$$

при чем для тонких стружек (для малых „ δ “) $BC \cong 0$, для толстых же—оно имеет некоторую конечную, возрастающую с увеличением „ δ “ величину, поэтому по этой схеме угол β_1 будет расти быстрее, чем по схеме черт. 2. Таким образом, даже не прибегая к измерению β_1 , можно было бы заранее предсказать характер его изменения с увеличением толщины снимаемого слоя.

Из таблиц и графиков видно, что K_1 (величина обратная коэффициенту поперечного утолщения стружки) также растет с увеличением „ δ “.

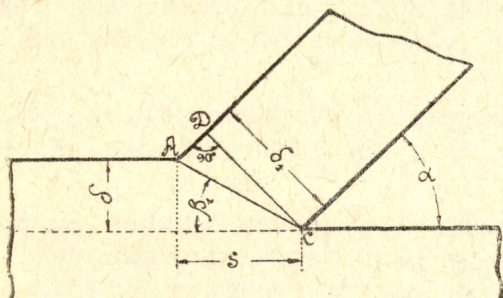
Итак наблюдается параллельное возрастание трех величин: β_1 , β_2 и K_1 при возрастании „ δ “. Значения β_1 , β_2 , K_1 как мы видим не укладываются точно на кривую, но имеют более или менее заметные отклонения, что вполне естественно в виду сложности процесса; но несмотря на отклонения, иногда довольно значительные, все же ясна общая тенденция этих величин к возрастанию с увеличением „ δ “. Отклонения особенно заметны при малых „ δ “, примерно же при $\delta > 1$ мм. они очень незначительны.

По таблицам (№ 7—9) также и по графикам можно заметить, что в случае отклонения какого либо значения K_1 от кривой средних значений [$k_1 = f(\delta)$], почти всегда величины β_1 и β_2 у этой же стружки дают отклонение того же знака от своих кривых [$\beta_1 = f'(\delta)$ и $\beta_2 = f''(\delta)$]. Особенно ясно это заметно, если взять несколько образцов с одинаковыми значениями „ δ “. Так мы имеем в таблице № 8 для образцов № 9 и № 79; № 149 и № 153; № 86 и № 4; № 147 и № 71; в таблице № 9 для образцов № 111 и № 137, № 75 и № 164. Во всех этих случаях с увеличением K_1 увеличиваются значения β_1 и β_2 при постоянном „ δ “ и невольно возникает мысль о взаимной связи между величинами K_1 , β_1 и β_2 . Связь такая несомненно должна существовать, так как, если при постоянной величине „ δ “, мы почему либо получим увеличение „ δ_1 “ (т.е. уменьшение K_1), то это повлечет увеличение „ s “, т.е. уменьшение β_1 .

Это нетрудно показать аналитически. Если возьмем для простоты случай тонкой стружки. то будем иметь (см. черт. № 18):

$$\begin{aligned}\delta_1 &= AC \cdot \sin(\alpha + \beta_1) \\ \delta &= AC \cdot \sin \beta_1 \\ K_1 &= \frac{\delta}{\delta_1} = \frac{\sin \beta_1}{\sin(\alpha + \beta_1)}.\end{aligned}$$

При $\alpha = \text{const}$: возрастание $K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$ связано с возрастанием β_1 и наоборот. Опыт же показал, что с изменением β_1 изменяется и β_2 . Изменение же величины K_1 , конечно, в силу природы деформации стружки, связано с изменением коэффициента продольной усадки K_0 .



Черт. № 18.

Вообще видимое изменение формы металла, при образовании стружки идет в трех направлениях: в направлении продольной усадки ($l_1 < l_0$), поперечн. утолщения ($\delta < \delta_1$) и поперечного уширения ($b_1 > b_0$). Если бы не имелось явления загибания (завивания) стружки и деформация во всех направлениях протекала бы абсолютно равномерно, то, предполагая примерное постоянство удельного веса металла, мы имели бы равенство:

$$l_0 \cdot \delta \cdot b_0 = l_1 \cdot \delta_1 \cdot b_1$$

и так как:

$$\frac{l_1}{l_0} = K_0$$

и

$$\frac{\delta}{\delta_1} = K_1,$$

то:

$$K_1 \cdot b_0 = K_0 \cdot b_1.$$

Здесь согласно предыдущему:

- l_0 — длина снятого слоя
- l_1 — „ полученной стружки
- δ — толщина снятого слоя
- δ_1 — „ снятой стружки
- b_0 — ширина снятого слоя
- b_1 — „ снятой стружки.

Опыт показывает, что всегда $b_1 > b_0$ (см. табл. №№ 4—6) и потому должно быть всегда:

$$K_1 > K_0,$$

однако мы не везде в таблицах имеем подтверждение этого соотношения. Так таблицы № 8 и 9 для углов $\alpha = 55^\circ$ и $\alpha = 65^\circ$ в большинстве случаев подтверждают его, таблица же № 7 дает для $\alpha = 45^\circ$ обратное соотношение.

Причины этого кроются в следующем:

Прежде всего длина снятой стружки, при наличии ее загибания, измеренная по стороне соприкосновения ее с резцом всегда бывает больше, чем по стороне противоположной, (внутренней стороне витка).

Нами для вычисления коэффициента продольной усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$, величина l_1 измерялась всегда по стороне соприкосновения с резцом, как это обыкновенно делается. Таким образом, величина K_0 у нас получалась несколько больше действительной, для получения которой следовало бы за длину снятой стружки (l_1) брать величину среднюю между длиной той и другой стороны стружки. Затем, при увеличении угла резанья „ α “ увеличивается поперечное уширение стружки (см. табл. № 4—6).

Благодаря первой из указанных причин мы могли получать $K_1 < K_0$, вторая же, действуя в обратную сторону, дала для больших углов α , $K_1 > K_0$.

Возвращаясь к взаимной связи между изменением величин β_1 , β_2 , K_1 и K_0 , постараемся доказать ее опытом. При рассматривании фотографий в связи с черт. № 17 и № 18, создается впечатление, что величина угла β_1 прежде всего зависит от относительного утолщения стружки в результате ее продольной усадки, значит от величин K_1 и K_0 . Полагая, что та или иная величина усадки, а значит и утолщения, создается в результате комплекса действующих на стружку внешних сил и зависит от их величины и направления, мы попробовали намеренно изменить их, что должно было при постоянстве „ δ “ и α так или иначе изменить величины β_1 , β_2 , K_1 и K_0 .

По свидетельству проф. Саввина²⁶), применение смазки при резаньи, в лучшем случае при употреблении льняного масла, понижало силу резанья на 30%, что несомненно являлось результатом уменьшения силы трения между стружкой и резцом, т.е. одной из действующих на стружку сил. Если при этом даже все остальные силы сохраняют свою величину и направление, то все же происходит значительное изменение в величине и направлении равнодействующей. Это обстоятельство было нами использовано и должно было послужить для выяснения высказанных выше предположений.

Были проведены опыты со смазкой при угле резанья $\alpha = 55^\circ$. В качестве смазывающего вещества было взято вареное льняное масло, которое в силу своей большой вязкости должно было дать значительный эффект. (В практике оно не применяется для смазки режущих инструментов, т.к. загустевая заполняет поры и каналы в станках. В нашем случае оно было вполне пригодно, в виду непродолжительности опыта). Опыты производились таким образом, что операция резанья протекала в масляной ванне, закрепленной на столе строгального станка, куда был погружен и кусок железа, с которого снималась стружка, и режущая часть резца. В отношении установки, измерений и приготовления шлифов порядок и методы оставались прежними. Часть опытов была проведена специально для установления зависимости коэффициента продольной усадки от толщины стружки „ δ “; часть для получения величин K_1 , β_1 и β_2 . В первом случае величина „ δ “ определялась методом взвешивания снятых стружек. Результаты собраны в табл. № 10 и № 11.

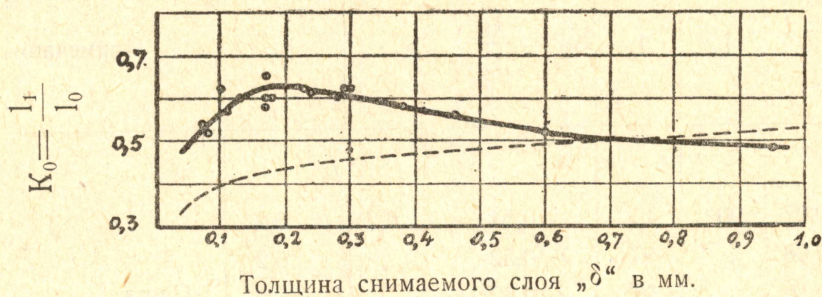
Таблица № 10; $\alpha = 55^\circ$.
С применением смазки.

№№ по пор.	№ образца	δ	l_0	l_1	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	b_0	b_1	Примечание
1	72	0,07	90	49	0,54	6,2	6,2	
2	70	0,08	"	46,5	0,52	"	6,2	
3	57	0,10	"	56	0,62	"	6,21	Сняты
4	56	0,11	"	51	0,57	"	6,21	
5	59	0,13	"	54	0,6	"	6,2	в маслянной
6	62	0,17	"	52	0,58	"	6,2	ванне.
7	163	0,17	81	53	0,65	"	—	
8	58	0,17	90	54	0,6	"	6,2	
9	55	0,18	"	54	0,6	"	6,21	
10	140	0,23	64,8	40	0,62	"	—	
11	162	0,24	81	49	0,61	"	—	
12	161	0,28	"	48	0,60	"	—	
13	160	0,29	"	50	0,62	"	—	
14	141	0,30	38,5	24	0,62	"	—	
15	144	0,38	83,5	48	0,58	"	—	
16	54	0,46	90	50	0,56	"	6,45	
17	143	0,60	54,0	28,0	0,52	"	—	
18	145	0,95	29,0	14,0	0,48	"	—	

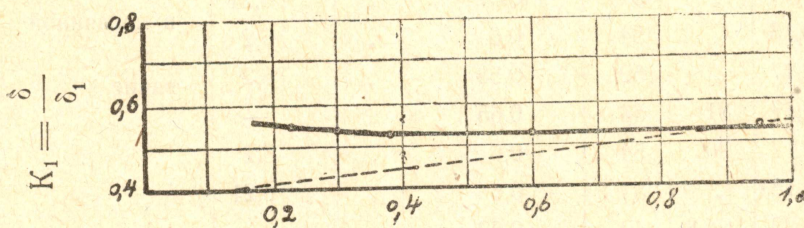
Таблица № 11; $\alpha = 55^\circ$.
С применением смазки.

№№ по пор.	№ образца	δ	δ_1	s	$\frac{h}{s_1}$	β_1	β_2	$K_1 = \frac{\delta}{\delta_1}$	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Примечание
1	140	0,23	0,42	0,6	—	36°	52°—54°	0,55	0,62	
2	141	0,30	0,56	1,0	—	34°	48°—50°	0,54	0,62	
3	144	0,38	0,72	1,5	$\frac{0,1}{0,7}$	34°	52°	0,53	0,58	Сняты
4	143	0,6	1,13	2,0	$\frac{0,08}{0,5}$	33°	50°—52°	0,53	0,52	в маслянной
5	145	0,95	1,75	2,6	$\frac{0,1}{0,7}$	34°	50°	0,54	0,48	ванне.

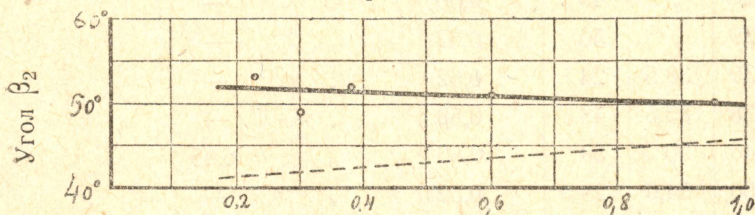
По таблице № 10 построен график черт. № 19, по табл. № 11, черт. № 20, 21, 22. На этих же чертежах для сравнения пунктиром нанесены зависимости для случая снятия стружки без смазки, при том же угле $\alpha = 55^\circ$, взятые с черт. 9—12.



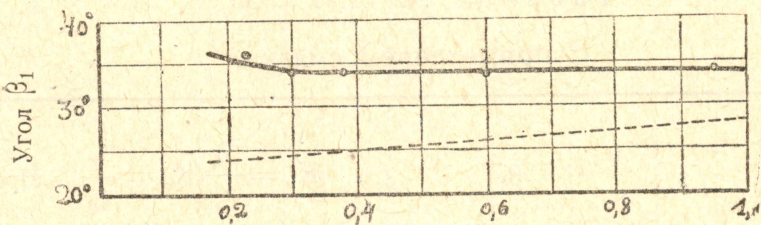
Черт. № 19.



Черт. № 20.



Черт. № 21.



Черт. № 22.

Из рассмотрения таблиц и графиков можно вывести следующие заключения. При самых малых величинах „ δ “ = 0,07 мм., усадка при употреблении смазки значительно меньше, чем без смазки; коэффициент усадки значительно больше. При возрастании толщины снимаемого слоя „ δ “ до величины $\delta = 0,2$ мм. наблюдается увеличение коэффициента усадки K_0 , подобно тому, как это мы имели и при отсутствии смазки; при дальнейшем увеличении „ δ “ коэффициент усадки переходит через максимум и затем начинает уменьшаться, но все же при этом превышает значения K_0 , полученные при отсутствии смазки

(пунктирная кривая). При увеличении толщины слоя до $\delta = 0,9-1$ мм. коэффициент усадки со смазкой сравнивается с таковым же без смазки и в дальнейшем изменение K_0 для обоих случаев должно пойти по одной кривой.

Таким характер изменения K_0 при употреблении смазки вполне естественен и объясняется тем, что при толщине слоя $\delta > 0,2$ мм. смазка видимо стала выжиматься из-под стружки и действовать лишь частично; при $\delta = 0,9$ мм. действие ее совершенно аннулировалось. Такой вывод кажется на первый взгляд несовместимым с известным и доказанным в настоящее время фактом, что удельное давление резанья с увеличением толщины слоя „ δ “ уменьшается. Однако, нужно принять во внимание, что величина удельного давления резанья относится к единице площади поперечного сечения снимаемой стружки, а не площади соприкосновения стружки с резцом, о величине которой и о характере изменения „ δ “ мы совершенно ничего не знаем, также как не знаем и о распределении давления на передней грани резца в месте соприкосновения стружки. Поэтому приходится удовлетвориться приведенным объяснением, тем более что все без исключения точки кривой черт. № 19, полученные из опытов, дали точное очертание и характер кривой без сколько нибудь значительных отклонений.

При употреблении смазки характер самой стружки отличается от стружки, снятой в сухую. При этом мы получаем, кроме меньшей усадки, также и меньшее поперечное уширение, что можно видеть из сравнения таблиц № 10 и № 5 и, что особенно характерно, при употреблении смазки стружка сильнее завивается и имеет виток меньшего диаметра, чем без смазки. Нами приведена фотография (фиг. № 12), где для сравнения представлены две стружки, снятые без смазки и две точно такой же толщины слоя, снятые со смазкой; мы видим резкое различие в диаметрах витков, при чем необходимо сказать, что это явление не случайное и все снятые нами стружки имели точно такой же характер.

На фотографии со смазкой: № 54 имеет $\delta = 0,46$ мм. и № 70 $\delta = 0,08$ мм. Без смазки: № 12— $\delta = 0,45$ мм. и № 14— $\delta = 0,07$ мм.

Уменьшение диаметра витка при смазке также указывает на уменьшение силы трения между стружкой и резцом.

Если мы обратимся к табл. № 11 и графикам № 20—22, построенным по ней то увидим, что при применении смазки с увеличением коэффициента усадки довольно значительно увеличились и величины K_1 , β_1 и β_2 . На этих же графиках нанесены пунктиром величины K_1 , β_1 и β_2 , полученные без смазки. Из сравнения видно, что сплошные кривые располагаются значительно выше пунктирных, а также, что характер изменения величин K_0 , K_1 , β_1 и β_2 таков, что не может быть сомнения в их взаимной связи. С применением смазки кривая K_0 расположилась выше; согласно приведенных выше соображений должны были в случае существования взаимной связи увеличиться и значения K_1 , β_1 и β_2 . Такое увеличение мы и наблюдаем, при чем, при падении значений K_0 после $\delta = 0,2$ мм. можно наблюдать и падение значений K_1 , β_1 и β_2 .

Таким образом опыты резанья со смазкой подтверждают существование зависимости между величинами продольной усадки, поперечного утолщения и углами β_1 и β_2 . Кроме того они дают указание, что изменение всех этих величин зависит от изменения действующих на стружку сил, в частности силы трения между стружкой и резцом.

Коль скоро имеется связь между K_0 и углами β_1 и β_2 по изменению усадки стружки можно составить представление об изменении β_1 и β_2 .

Можно предположить, что в материалах различной твердости при прочих равных условиях, будут получаться различные величины β_1 и β_2 . По опытам проф. Соколова⁷⁾ для более твердых металлов коэффициент усадки получается больше, можно сказать что при этом и величины β_1 и β_2 будут выше, чем для более мягких.

Связью между изменением продольной усадки стружки и углов β_1 и β_2 мы воспользовались для решения вопроса об изменении углов β_1 и β_2 в зависимости от скорости резанья. Этот вопрос заинтересовал нас по той причине, что фактически на наших фотографиях мы могли наблюдать стружки, полученные при скоростях, отличающихся от нормальной, при которой мы производили опыты, и соответствующих моменту остановки станка, т.-е. когда скорость в какой-то более или менее короткий промежуток времени падает до нуля. Вообще говоря, мы не видим возможности мгновенно остановить станок и в последний момент скорость всегда будет изменяться до нуля, проходя через промежуточные значения, при чем это изменение будет происходить различно для различных сечений стружки и различных углов резанья, быстрее для больших, в виду большего сопротивления резанья, тормозящего ход стола, медленнее для малых. Поэтому необходимо было выяснить, насколько заметно может это исказить получаемую картину в отношении величин углов β_1 и β_2 . Для выяснения этого достаточно было определить изменение коэффициента усадки стружки при изменении скорости резанья.

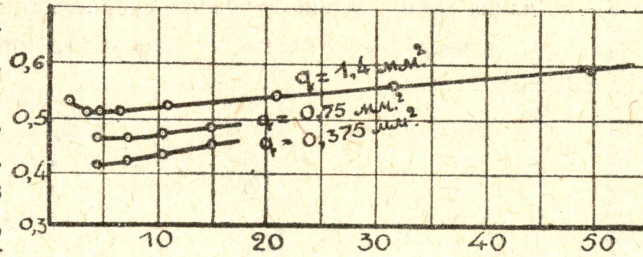
Для опыта была взята предварительно сбранный и гладко обточенная железная болванка, на поверхности которой параллельно оси была профрезирована канавка глубиной 0,5 мм. и шириной 1,5 мм. Болванка была установлена на токарном станке, где с нее при разных скоростях снималась стружка, на которой прорезанная канавка оставляла отметки, делящие стружку на отрезки, точно соответствующие длине пути резанья на протяжении полной окружности болванки (т.-е. за один оборот). Измеряя длину полученных при разных скоростях отрезков стружки и зная длину окружности болванки (измеренную по среднему диаметру резанья), можно было вычислить коэффициенты усадки. Для того, чтобы иметь строго постоянную величину подачи во все время опыта, работа велась по ходовому винту, с соответственно подобранными сменными шестернями. Резец применялся из быстрорежущей стали, способный выдержать большие скорости резанья без затупления, при чем каждая серия опытов проводилась с одной установки резца; таким образом сохранялись постоянные величины углов резанья, установки и т. д. Во время опыта резец, будучи закреплен в суппорте подправлялся оселком для поддержания примерно одной остроты лезвия. Опыты были проведены при угле резанья $\alpha = 55^\circ$. Первая серия была произведена со стружкой размерами: глубина резанья $t = 3,25$ мм.; подача $s = 0,43$ мм/об.; ширина стружки $b = 6,5$ мм.; сечение стружки $q = 1,4$ мм.². Для этого был использован сильный токарный станок с 8 скоростями. К сожалению, этим станком мы могли пользоваться лишь непродолжительное время.

Вторая серия опытов была проведена с тем же углом резанья и с размерами стружки: $t = 2,5$ м/м.; $S = 0,3$ мм./об.; $b = 5$ м/м.;

$q = 0,75$ м/м.². Третья серия с тем же углом резанья и с размерами стружки: $t = 2,5$ м/м.; $S = 0,15$ мм./об.; $b = 5$ м/м.; $q = 0,375$ м/м.².

Для этих двух серий нам пришлось воспользоваться более слабым станком, который стружки упомянутых размеров мог снимать лишь при четырех скоростях.

По результатам опытов составлены таблицы № 12, № 13 и № 14 и график черт. № 23.



Черт. № 23.

Таблица № 12.

Угол резанья $\alpha = 55^\circ$, глубина резанья $t = 3,25$ м/м., подача $S = 0,43$ мм./об., ширина стружки $b = 6,5$ мм., сечение стружки $q = 1,4$ мм.².

№№ по пор.	l_0 длина пути в мм.	l_1 длина стружки в мм.	V скорость реза- нья мтр./мин.	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	K_0 среднее
1	214,5	115,0	1,72	0,536	
2	"	113,5	"	0,529	
3	"	116,0	"	0,541	0,53
4	"	115,0	"	0,536	
5	"	116,0	"	0,541	
6	"	113,0	"	0,527	
7	214,5	111,0	3,25	0,527	
8	"	110,5	"	0,515	
9	"	110,5	"	0,515	0,51
10	"	111,0	"	0,517	
11	"	110,0	"	0,513	
12	"	109,0	"	0,508	
13	214,5	111,5	4,55	0,519	
14	"	111,0	"	0,517	
15	"	108,0	"	0,503	0,51
16	"	109,5	"	0,510	
17	"	111,0	"	0,517	
18	"	110,5	"	0,517	
19	214,5	111,0	6,50	0,517	
20	"	108,0	"	0,503	
21	"	111,0	"	0,517	0,51
22	"	110,0	"	0,513	
23	"	111,0	"	0,517	
24	"	111,0	"	0,517	
25	214,5	110,5	10,8	0,515	
26	"	114,0	"	0,531	
27	"	113,0	"	0,527	0,52
28	"	111,5	"	0,519	
29	"	111,5	"	0,519	
30	"	112,0	"	0,522	

№№ по пор.	l_0 длина пути в мм.	l_1 длина стружки в мм.	V скорость реза- нья мтр./мин.	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	K_0 среднее
31	214,5	11,5	20,75	0,543	0,54
32	"	117,0	"	0,545	
33	"	115,0	"	0,536	
34	"	117,5	"	0,547	
35	"	117,0	"	0,545	
36	"	116,5	"	0,543	
37	214,5	118,0	31,5	0,550	0,56
38	"	120,0	"	0,559	
39	"	120,0	"	0,559	
40	"	121,0	"	0,564	
41	"	119,0	"	0,555	
42	"	119,5	"	0,557	
43	214,5	129,0	49,7	0,601	0,59
44	"	130,0	"	0,605	
45	"	125,0	"	0,582	
46	"	127,0	"	0,591	
47	"	129,0	"	0,601	
48	"	125,5	"	0,585	

Таблица № 13.

$\alpha = 55^\circ$; $t = 2,5$ мм.; $S = 0,3$ мм./об.;
 $b = 5$ мм.; $q = 0,75$ мм.²

№№ по пор.	l_0 мм.	l_1 мм.	V мтр./мин.	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	K_0 среднее
1	196,3	90,0	4,2	0,46	0,46
2	"	90,0	"	0,46	
3	"	89,0	"	0,45	
4	"	90,5	"	0,46	
5	"	90,5	"	0,46	
6	196,3	92,0	7,0	0,47	0,46
7	"	91,0	"	0,46	
8	"	91,5	"	0,47	
9	"	90,5	"	0,46	
10	"	91,0	"	0,46	
11	196,3	91,0	10,2	0,46	0,47
12	"	92,0	"	0,47	
13	"	91,5	"	0,47	
14	"	92,0	"	0,47	
15	"	92,5	"	0,47	
16	196,3	95,0	4,61	0,48	0,48
17	"	94,5	"	0,48	
18	"	95,5	"	0,49	
19	"	95,0	"	0,48	
20	"	94,5	"	0,48	

Таблица № 14.

$\alpha = 55^\circ$; $t = 2,5$ мм.; $S = 0,15$ мм./об.;
 $b = 5$ мм.; $q = 0,375$ мм.²

№№ по пор.	l_0 мм.	l_1 мм.	V мтр./мин.	$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	K_0 среднее
1	196,3	79,0	4,2	0,40	
2	"	80,0	"	0,41	
3	"	80,0	"	0,41	0,41
4	"	80,0	"	0,41	
5	"	80,0	"	0,41	
6	196,3	82,0	7,0	0,42	
7	"	79,5	"	0,41	
8	"	82,5	"	0,42	0,42
9	"	82,5	"	0,42	
10	"	82,5	"	0,42	
11	196,3	85,0	10,2	0,43	
12	"	84,0	"	0,43	
13	"	84,0	"	0,43	0,43
14	"	84,0	"	0,43	
15	"	84,5	"	0,43	
16	196,3	88,0	14,6	0,45	
17	"	89,0	"	0,45	
18	"	89,0	"	0,45	0,45
19	"	88,5	"	0,45	
20	"	89,0	"	0,45	

Как таблицы, так и график показывают, что во всех трех сериях опытов, при трех различных сечениях стружки зависимость коэффициента продольной усадки от скорости резанья сохраняет постоянный характер. Сперва коэффициент усадки при увеличении скорости резанья незначительно уменьшается (усадка увеличивается), затем начинает медленно возрастать. В пределах скоростей от нуля до 15 метров в минуту это изменение настолько незначительно, что мы не будем иметь при изменении скорости в этих пределах сколько нибудь заметного изменения углов β_1 и β_2 . Таким образом можно заключить, что полученные нами для этих углов зависимости не будут искажены и в пределах упомянутых скоростей сохранят свой вид. При более значительных скоростях величины углов β_1 и β_2 будут изменяться, несколько увеличиваясь с возрастанием скорости резанья. Как это увеличение будет идти для различных сечений стружки, без проведения специальных опытов, для которых мы, к сожалению, не имели времени и возможностей, сказать трудно.

Мы имеем некоторые основания предполагать (нами проведены ориентировочные опыты, не помещаемые здесь), что при других углах резанья зависимость усадки от скорости будет иметь несколько иной характер, минимум коэффициента усадки будет расположен уже не при $V = 5$ м/мин. как мы имеем здесь, а при иной скорости. Но и там в пределах употребительных скоростей изменение K_0 очень незначительно и не может создать заметного изменения углов β_1 и β_2 .

Между прочим нами замечено, что при повышении скорости всегда увеличивается диаметр витка стружки, независимо от того, уменьшается или увеличивается при этом усадка. На фиг. № 19 представлены стружки, снятые с все увеличивающейся скоростью.

О причинах изменения продольной усадки с изменением скорости трудно сказать определенно без проведения специальных опытов, но все же можно высказать предположение, что одной из причин, влияющих на изменение усадки стружки, является изменяющаяся с изменением скорости температура стружки и различная, при различных температурах, способность обрабатываемого металла к „наклепу при резаньи“, (что открыто впервые Гербертом)¹¹⁾, а значит и различная его вязкость и способность воспринимать деформацию.

Здесь же попутно возникает вопрос, не получили-ли мы в опытах с применением смазки при постоянной скорости резанья, равной 8 м/мин., увеличение коэффициента усадки стружки за счет того, что при увеличении ее сечения поддерживали ее температуру примерно постоянной, т.-е. снижали ее в сравнении с той, которая была бы при увеличении сечения без применения смазки. При этом снижение температуры введением смазки должно было бы произвести то же действие, что и уменьшение скорости с 8 метров в минуту до некоторой меньшей величины на диаграмме черт. № 23. Однако, сравнение этого чертежа с черт.: № 19 дает возможность заключить, что в то время, как при изменении скорости усадка изменяется в пределах малых скоростей (8—0 м/мин.) очень незначительно, мы получили введением смазки очень значительное изменение коэффициента усадки при тех же значениях толщины стружки, что может быть отнесено как это нами и сделано уже ранее), лишь за счет изменения величины и направления действующих на стружку сил.

Итак в результате всех описанных до сих пор опытов со сливной стружкой, мы можем сказать, что:

1. Продольная усадка стружки зависит при постоянном материале от угла резанья, толщины снимаемого слоя, скорости резанья и величины и направления действующих на стружку сил.

2. Угол сдвигов β_2 и угол β_1 , ограничивающий линии деформаций в стружке, отнюдь не являются величиной постоянной. Они изменяются очень значительно с изменением толщины снимаемого слоя, менее значительно с изменением угла резанья, качества обрабатываемого материала и скорости резанья. При всех прочих равных условиях изменение величины и направления действующих сил влечет за собой также изменение углов β_1 и β_2 .

3. Изменение углов β_1 и β_2 связано с изменением продольной усадки и поперечного утолщения стружки.

Кстати будет сказать, что проф. Тиме утверждал наличие связи между углами скалывания и усадкой стружки, но по его мнению, первопричиной всех изменений в стружке являлся именно постоянный угол скалывания β_1 , который отграничивал деформированную стружку от совершенно не деформированного металла образца; величина коэффициента усадки также зависела от угла β_1 .

То, что с изменением толщины снимаемого слоя изменяется усадка, — (изменение это по мнению Тиме было очень мало), являлось результатом изменения угла β_1 , которое по его мнению было настолько незначительно, что терялось даже в сравнении с изменением β_1 в зависимости от угла резанья α , которое по его данным колебалось в пределах лишь 10° .

Мы видим, однако, что углы β_1 и β_2 колеблются в очень широких пределах и особенно значительное их изменение происходит при изменении толщины стружки. Так, например, для угла резанья $\alpha = 65^\circ$, β_1 меняется от 14° до 42° ; β_2 от 27° до 55° ; пределы, как мы видим, очень широкие.

Причиной усадки стружки Тиме считает деформацию последовательного скалывания (сдвига) слоев под определенным углом β_1 .

Афанасьев, наоборот, считает что усадка стружки имеет причиной лишь сжатие металла перед резцом. Последующие исследователи в большинстве случаев отдают предпочтение мнению проф. Тиме.

Зависимость между углом скалывания и коэффициентом усадки при учете процесса образования стружки им дана в следующем виде

$$K_0 = \frac{\sin \beta_1}{\sin (180^\circ - \alpha - \beta_1)}$$

Выражение это проф. Тиме было выведено для случая стружки разделенной на элементы, но автор считал, что так как в сливной стружке имеются невидимые плоскости скалывания, направленные под углом β_1 к направлению движения резца, то это выражение годится и для вычисления коэффициента усадки в случае сливной стружки. Им по этой формуле выяснялась усадка для железной стружки при угле резанья $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 55^\circ$, при этом, как он сам в дальнейшем замечает, стружка была совершенно сливная. Величины коэффициента усадки полученные из формулы у него близко сходятся с непосредственным измерением стружки и это как бы является хорошим доказательством того, что данное им выражение для коэффициента усадки соответствует действительности, даже вскрывает самый процесс образования стружки путем последовательного скалывания под углом β_1 и как бы

свидетельствует о том, что основной и преобладающей причиной усадки является процесс последовательных сдвигов (скальваний) слоев стружки.

Но мы показали, что в сливной стружке существуют сдвиги лишь под углом β_2 и, если бы усадка создавалась только за счет сдвигов, то в этом случае, подставив в формулу усадки вместо угла β_1 действительные, полученные по опыту углы сдвигов β_2 , мы должны были бы получить вычислением величины более или менее близко совпадающие с величинами усадки, полученными из опыта.

Мы проделали такую попытку для угла резанья $\alpha = 55^\circ$. Коэффициенты усадки, полученные вычислением из формулы, нанесены на черт. № 9 пунктирной кривой. Мы видим, что кривая эта идет параллельно действительной (сплошной), но много выше ее, т.е. коэффициенты усадки, полученные вычислением, слишком велики, усадка слишком мала, много меньше действительной. Таким образом сдвиги в стружке не могут создать всей величины существующей усадки, в процессе, повидимому, участвуют и иные виды деформаций, среди которых, несомненно, присутствие и деформации сжатия.

Формула проф. Тиме не учитывает этого, потому при подстановке в нее действительных углов скальвания β_2 , она дает неудовлетворительные результаты.

Если же мы подставим в нее полученные нами из опыта углы β_1 , то получим вычислением значения усадки чрезвычайно близко подходящие к действительным. Это является вполне естественным, так как в действительности формула для усадки стружки проф. Тиме выражает лишь чисто-геометрические соотношения между размерами стружки и снимаемого слоя металла, может быть выведена из условия постоянства объема металла, переходящего в стружку и в каком бы направлении не происходили сдвиги в стружке, будь то под углом β_1 , как это полагает проф. Тиме, или же под каким нибудь иным углом (β_2), пусть даже вообще сдвиги отсутствуют, она будет давать результаты соответствующие действительности, если правильно определен угол β_1 , ограничивающий стружку и составленный направлением движения резца и прямой, идущей в простейшем случае от кончика резца к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку. Поэтому-то выражения для усадки стружки проф. Тиме и проф. Афанасьева вполне совпадают несмотря на то, что они видят причинами усадки совершенно различные явления.

Кроме деформаций скальвания и сжатия несомненным является и деформация изгиба стружки. Для доказательства мы приводим фотографию, снятую с поперечных разрезов двух различного сечения стружек (см. фиг. № 13). Как та, так и другая дают ярко выраженное трапецеидальное сечение. Меньшая из параллельных сторон трапеции является стороной стружки, прилегающей к резцу. Она совершенно прямолинейна. Большая же, находящаяся как раз на вогнутой стороне стружки, имеет некоторую выпуклость. Таким образом, ширина стружки имеет переменную величину, увеличиваясь к стороне стружки, находящейся на внутренней части витка.

Такое сечение, получившиеся из прямоугольного, указывает, что здесь имели место, кроме всех прочих деформаций, как следствие различных действующих сил, деформации изгиба, в результате которых часть стружки, находящаяся выше воспринимаемой нейтральной линии, получила поперечное уширение. При чистом изгибе мы должны были бы иметь ниже нейтральной линии уменьшение ширины, в результате про-

дольного удлинения; но в настоящем случае кроме изгиба имеется еще и значительная деформация продольного сжатия, которое уничтожает, являющееся в результате изгиба, растяжение слоев стружки, прилегающих к резцу и тем самым, как бы выносит нейтральную линию из пределов сечения, оставляя у изогнутой балки лишь сжатую область с переменной степенью сжатия. Если бы не было изгиба, сечение стружки должно было бы давать иную картину. По теории же образования стружки проф. Тиме, предполагающего, что стружка завивается не в результате ее изгиба, а лишь в результате деформаций сжатия, при врезывании кончика резца в очередной элемент стружки и дальнейшего скалывания элемента, стружка должна была бы повидимому иметь совершенно иное сечение с наибольшим уширением у сторони, прилегающей к резцу.

Примечание: После того, как нами показано присутствие изгиба в стружке, можно, вернувшись к таблицам № 7—8 и чертежам № 5—12, сказать что полученные резкие колебания при $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 55^\circ$ значений β_1 и β_2 в тонких стружках, сопровождаемые такими же колебаниями K_1 и K_0 вероятно объясняются тем, что тонкие стружки, в силу различных причин менее постоянно сопротивляются изгибу, чем толстые, что вызывает изменение силы трения стружки по резцу и связанное с этим изменение величин β_1 , β_2 , K_1 и K_0 . Колебания тех же величин при $\alpha = 65^\circ$ (см. черт. № 13—16) объясняется кроме того, тем что часть тонких стружек было разделено на элементы; при этом, как мы в дальнейшем укажем, получаются колебания значений β_1 и β_2 . На черт. 13—16 стружки разделенные на элементы обозначены двойными кружками.

В заключение отдела о сливной стружке, коснемся вопроса об образовании неровностей (зазубрин) на стороне стружки, прилегающей к резцу и на подрезцовой поверхности. Это явление распространяется на все виды стружки, но в сливной наиболее ярко выражено.

При разборе строения стружки указывалось на то, что линии сдвигов в стружке при приближении к плоскости резца теряют свою прямолинейность, изгибаясь в направлении противоположном движению стружки по резцу. Это искривление тем более ярко выражено, чем значительнее толщина снимаемого слоя. Получается своеобразное отставание металла прилегающего к резцу, от всей остальной части стружки в движении ее по передней грани резца. Вполне вероятной причиной образования такой „области застоя“ является значительное трение между стружкой и резцом. „Область застоя“ дополняется часто зазубринами на стружке, образование которых наблюдается почти во всех рассмотренных нами во время опытов случаях. На подрезцовой поверхности также имеются зазубрины, как это уже указывалось.

Первым обратил внимание на это явление и попытался дать объяснение Усачов⁸⁾. По его мнению зазубрины на стружке и на подрезцовой поверхности образуются только в том случае, если на резце имеется нарост из спрессованных и приваренных к кончику резца частичек металла.

Явление нароста стало известно в литературе со времени Тейлора²⁷⁾, который считал, что стружка не режется лезвием резца, а отрывается впереди его, создавая на подрезцовой поверхности неровности, которые срезаются лезвием резца в виде мелких частиц металла, спрессовываются и привариваются под влиянием большого давления и нагрева к передней грани резца, образуя нарост или, как его называют „кромочный придаток“. Rosenhain и Styrney¹²⁾, держатся мнения, что нарост является частью снимаемой стружки, Gerbert¹¹⁾ считает, что здесь имеется часть металла и от подрезцовой поверхности. Усачев не

высказывает насчет природы нароста ясного мнения, ограничиваясь не вполне понятным утверждением, что „металл нароста спрессован, не принадлежит ни стружке, ни предмету и движется вместе с резцом во время резанья“.

Как было сказано, нарост по мнению Усачева и является причиной образования зазубрин как на стружке, так и на подрезцовой поверхности. Процесс образования их, по мнению Усачева, таков: „Конец нароста над лезвием резца имеет закругленную форму и потому не может так чисто разрезать металл, как разрезает его лезвие резца. Округленный конец нароста спрессовывает металл, увлекает его за собой, не отрывая от предмета и, когда накопится большой слой этого, как бы дополняющего нарост, металла, он разрывается. Одна часть слоя остается на предмете, образуя зазубрину, другая удаляется со стружкой, образуя на ней такую же зазубрину, но только более спрессованную“.

У нас имеется ряд возражений против такого объяснения. Прежде всего на протяжении почти сотни опытов мы очень редко имели нарост на резце, в то время как почти во всех случаях наблюдались зазубрины и на стружке и на подрезцовой поверхности. Затем, если бы имелась связь между образованием тех и других зазубрин в том виде, как ее приводит Усачев, т. е. одна дополняла бы другую, то количество зазубрин на стружке и подрезцовой поверхности должно было бы быть одно и то же и, в силу усадки, зазубрины на стружке были бы значительно короче, чем на подрезцовой поверхности. Из рассмотрения предлагаемых нами фотографий, можно видеть совершенно обратное соотношение тех и других, в подавляющем большинстве случаев зазубрины на стружке много длиннее чем на подрезцовой поверхности (см. фиг. № 4, 5, 6, 10, 11): кроме того нередки случаи, когда при совершенном отсутствии каких либо неровностей на стружке, наблюдаются ярко выраженные зазубрины на подрезцовой поверхности.

Нельзя согласиться и с Клопштоком¹⁰), который относит образование неровностей на подрезцовой поверхности лишь за счет дрожания резца при отделении элементов стружки, и считает, что число зазубрин равно таким образом числу элементов стружки, что никоим образом не может объяснить явления в случае совершенно сливной стружки.

Мы пришли к убеждению, что непосредственной связи между зазубринами на стружке и на подрезцовой поверхности не имеется, разве только кроме того, что в образовании, как тех, так и других, играет некоторую роль распространяющаяся перед кончиком резца трещинка, идущая немного вперед и вглубь обрабатываемого материала. Обыкновенно в сливной стружке она бывает очень мала и становится заметна лишь при очень тщательной шлифовке и достаточном увеличении, притом, как мы в дальнейшем покажем, имеет периодичность образования, связанную с образованием зазубрин на подрезцовой поверхности, так что бывают моменты, когда она отсутствует. На фиг. № 6 эта трещина ясно различима; видно, что она очень незначительна и не может быть отождествлена с явлением отдиранья стружки, которое по предположениям Тейлора должно создавать благоприятные условия для работы самого лезвия резца, освобождая его от соприкосновения с металлом, истирания и чрезмерного нагрева.

Основной причиной образования зазубрин на стружке является сила трения между стружкой и резцом, создающая „область застоя“. Как бы мала ни была распространяющаяся перед концом трещина, все же она обу-

заваливает неизбежность хотя бы и незначительных надрывов на отделяемой стружке. В результате значительного трения слой металла, прилегающий к передней грани резца, стремится на ней задержаться, отставая от всей остальной стружки, благодаря же стремлению всей стружки и особенно той части ее, которая уже вышла из соприкосновения с резцом, продвигаться вперед и отделиться от части задерживаемой трением, происходит углубление надрывов на стружке, осаживание мелких неровностей и превращение их в зазубрины. Часть металла, задержанная на резце трением, имея меньшую, возможно даже равную нулю, скорость движения, создает впереди лежащем материале депрессию, которая все возрастая преодолевает, наконец, силу трения на резце и заставляет очередную часть „области застоя“ с последней зазубриной сдвинуться, соскользнуть с передней грани резца, освободив место для образования следующей зазубрины. Это соскальзывание может произойти или мгновенно, или путем постепенного сдвигания. В первом случае возможно более или менее скачкообразное перемещение стружки по резцу, что может являться причиной периодического падения и возрастания силы трения на резце и общего давления резанья даже при сливной железной стружке, как то показывают специальные диаграммы²³). Во втором случае „область застоя“ и последняя зазубрина делятся на ряд мелких частей, последовательно соскальзывающих с резца. Такой случай, довольно редкий, представлен на фиг. № 14. Здесь, кроме того ясно видна трещина перед кончиком резца, о которой говорилось раньше.

Но может быть и совершенно иное течение процесса движения стружки по резцу. Сила, удерживающая прилегающую к резцу часть стружки, бывает иногда настолько велика, что возрастающая депрессия не в состоянии сдвинуть, образовавшуюся в „области застоя“, зазубрину с передней грани. Продолжающееся образование и перемещение стружки производит при этом с одной стороны дальнейшее распространение надрыва между стружкой и зазубриной, с другой стороны увеличивает идущую перед концом резца трещину, которая в конце концов соединяется с надрывом и таким образом отделяет приставшую к резцу зазубрину от движущейся стружки. Зазубрина под влиянием высокой температуры и чрезвычайно значительного наклепа как бы приваривается к передней грани резца, получает высокую твердость и принимает активное участие в дальнейшем образовании стружки, заменяя лезвие резца и защищая его от разрушения.

Момент, предшествующий отделению зазубрины от стружки и приварки ее к резцу у нас зафиксирован на фиг. № 15. Здесь, как мы видим, надрыв между стружкой и последней зазубриной зашел очень далеко и уже наметилась линия дальнейшего отделения зазубрины от стружки.

Таким образом отделившаяся от стружки зазубрина превращается в нарост на резце (кромочный придаток) и фиг. № 15. также как и фиг. № 14 и № 16 ясно показывают, что до своего образования он принадлежал стружке, составляя с ней одно целое.

Возникает вопрос,—может ли зазубрина, отделенная от стружки и приставшая к резцу, исполнять функции последнего при резаньи того же материала, из которого она состоит. На это лучше всего можно ответить, сопоставив две работы проф. Герберта. В одной из них²⁸) автор, исследуя при помощи своего маятникового прибора твердость закаленных резцов, с целью получения наилучших условий термической

обработки инструмента, нашол, что при наиболее благоприятных условиях твердость закаленной быстрорежущей стали [C=0,7%; Cr=4%; Va=1%; W=18%; Si=0,2%; Mn=0,2%], в пределах температур 100°—560° равна в среднем 55 (число твердости Герберга). В другой работе¹¹⁾, при исследовании тем же прибором твердости в разных местах отделяемой стружки, с целью изучения процесса нажещения металла при резаньи, было найдено, что, в то время как первоначальная твердость металла равнялась 19,9, твердость в стружке 32-38, твердость в зазубрине, прилегающей к передней грани резца достигала высоких пределов=53,4 и таким образом равнялась твердости лучшего режущего инструмента. Схема стружки с обозначенными на ней числами твердости в испытанных местах, заимствованная из вышеуказанной работы, приводится нами на фиг. № 16.

В случае образования нароста работа резанья идет при более благоприятных условиях, так как при этом происходит уменьшение угла резанья без уменьшения стойкости и прочности резца. Во время работы нарост постепенно истирается или срывается с передней грани при сотрясении или ударе (например при строгании). Затем может наступить замена его одной из ряда последующих в „области застоя“; зазубрин и т. д.

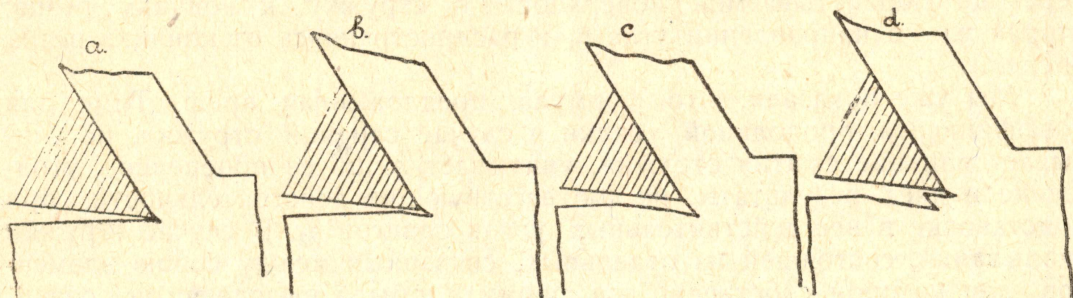
Таким образом мы показали, что непременным условием возможности образования нароста на резце является наличие зазубрин на стружке, но не наоборот, как это предполагает Усачев. Нарост является одной из зазубрин и следовательно образуется из металла, принадлежащего стружке.

Rosenhain и Styrney¹²⁾ нашли, что „область застоя“, или, как они ее называют, „зона глубоких деформаций“ при резаньи бронзы встречается лишь при углах резанья $\alpha > 60^\circ$, при чем, линия отделяющая эту зону от остальной стружки делает с направлением движения резца постоянный угол в 60° и с направлением скалывания в стружке угол в 90° , что в свою очередь обуславливает постоянство угла скалывания в стружке, который должен равняться 30° .

Все эти положения не находят подтверждения в случае железной стружки. При всех углах резанья начиная с 45° мы имели более или менее ясно выраженную „область застоя“ в стружке, постоянство же угла скалывания β_2 нами уже своевременно опровергнуто; кроме того и линия, отделяющая „область застоя“ от стружки, в наших опытах не делает постоянного угла ни с направлением движения резца, ни с направлением скалывания в стружке.

Переходя к зазубринам на подрезцовой поверхности, прежде всего нужно сказать, что основной причиной их образования является трещинка, идущая перед кончиком резца. Имея направление не только вперед, но и в глубь обрабатываемого предмета, она может распространяться лишь до некоторой предельной величины, зависящей от размеров стружки и свойств прочности обрабатываемого материала. В некоторый момент, когда величина ее достигает предельной, дальнейшее распространение ее прекращается, кончик резца, срезав верхнюю сторону трещины (переходящую в стружку), образует таким образом острую зазубрину на подрезцовой поверхности. При дальнейшем движении начинается образование новой трещины, которая распространяясь достигает предельной величины и т. д. процесс периодически повторяется через приблизительно равные, зависящие от размеров стружки, промежутки. На чертеже № 24 схематически представлены

последовательные стадии процесса образования зазубрин на подрезочной поверхности. „а“—начало образования трещины, „б“—углубление ее, „с“—достижение предельной величины, „д“—образование зазубрины и начало образования новой трещины. Отдельные стадии процесса можно заметить и на фотографиях (фиг. № 14, 10, 11 и 17).



Черт. № 24.

Из таблиц № 7—9 можно усмотреть, что среднее расстояние между зазубринами „ S_1 “ и глубина зазубрин h возрастают с увеличением толщины снимаемого слоя „ δ “ и с увеличением угла резанья „ α “, т. е. увеличивается неравномерность обработанной поверхности.

2. Стружка, разделенная на элементы.

При описании строения стружки, полученной при угле резанья $\alpha=65^\circ$, при малых значениях толщины снимаемого слоя, мы уже столкнулись со стружкой отличной по своему виду от сливной и состоящей из отдельных элементов, суставчиков, все же связанных между собой.

При углах резанья $\alpha=75^\circ$ и $\alpha=85^\circ$ мы получали при малых значениях „ δ “ точно такие же стружки. Фиг. № 18 дает пример такой стружки при угле резанья $\alpha=85^\circ$ и толщине снимаемого слоя $\delta=0,1$ мм. Она по строению своему ничем не отличается от стружки фиг. № 7 и точно также состоит из связанных между собой элементов. Этот тип принято называть стружкой скалывания. Она наиболее соответствует тому представлению об образовании стружки, которое дал в своей теории проф. Тиме, но является лишь частным случаем и охватывает у нас лишь узкую область, характеризуемую малыми значениями „ δ “ и большими „ α “.

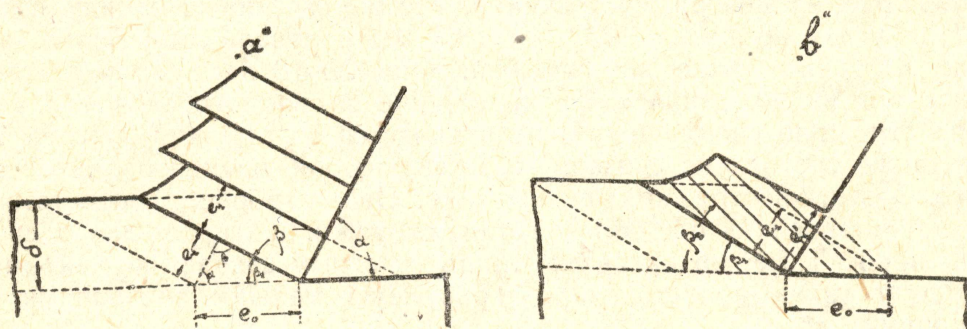
В этом типе, как уже было сказано раньше, разделение элементов происходит в направлении угла β_1 , в каждом же отдельном элементе деформация идет в направлении угла β_2 . На фотографии № 18 чрезвычайно ясно заметны как та, так и другая деформация. Таким образом при образовании элемента мы имеем тот же процесс, что и в сливной стружке, затем, по достижении элементом некоторой предельной величины, происходит скалывание в направлении угла β_1 . Последнее явление и было замечено проф. Тиме и было распространено им на все виды стружки, деформации же в каждом отдельном элементе в направлении угла β_2 замечены не были и ни в одной из теорий образования стружки, пользующихся как основой результатами его наблюдений (Зворыкин, Погоржельский, Афанасьев) не получили выражения.

Деформации в такой стружке чрезвычайно велики. Продольная усадка здесь зависит уже от двух причин, с одной стороны от сжатия металла и сдвигов внутри элементов, с другой стороны, от относитель-

ного перемещения отдельных элементов между собой. Та и другая деформации имеют принципиальную разницу и, повидимому, в своей основе различные причины, так как первая происходит в направлении угла β_2 и, как нами уже было показано, распространение сдвигов идет при этом в направлении, обратном движению резца, именно от точки перехода обрабатываемой поверхности в стружку, к кончику резца; вторая же—в направлении угла β_1 и распространяясь от кончика резца вперед.

Мы уже показали, что формула, предложенная проф. Тиме для коэффициента продольной усадки в случае сливной стружки, не учитывает влияние сжатия стружки, учитывает лишь ее поперечное утолщение и дает результаты, не соответствующие действительности, при подстановке в нее действительных углов сдвигов β_2 . В случае стружки скалывания, состоящей из отдельных, связанных между собою элементов, для которой собственно эта формула и была выведена, она совершенно непригодна, даже если не принимать во внимание второстепенных деформаций как поперечное уширение, изгиб и т. д. И при этом

условии выражение для коэффициента усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0} = \frac{\sin \beta_1}{\sin (180^\circ - \alpha - \beta_1)}$, может дать соответствующие действительности результаты только в том случае, если после деформации каждый отдельный элемент имеет форму параллелограмма или трапеции с двумя параллельными сторонами, отстоящими на том же расстоянии друг от друга (l_1), что и до деформации. Схема „а“ чертежа № 25 дает форму элемента стружки скалывания, после предшествовавшего скалыванию сжатия при которой



Черт. № 25.

усадка выражалась бы приведенной выше формулой. В действительности же в период, предшествовавший скалыванию, в элементе происходят сдвиги в направлении угла β_2 , так что идеальная форма элемента будет такая, как на схеме „b“ того чертежа. Каждая точка элемента перемещается в направлении стороны угла β_2 и т. к. всегда $\beta_2 > \beta_1$ то и действительная длина элемента l_1' будет всегда больше чем l_1 (по схеме а). Полученные фотографии вполне соответствуют нашей схеме.

Таким образом две причины, создающие явление усадки, действуют в противоположном направлении: скольжение под углом β_1 (разделение элементов) укорачивает стружку, скольжение под углом β_2 (в каждом элементе) уменьшает это укорачивание в том смысле, что без него укорачивание было бы значительнее. В действительности явление еще более усложняется благодаря тому, что при начале образования каждого элемента резец снимает стружку переменной (все увеличивающейся) толщины и можно полагать, что при этом искажаются и величины

углов β_1 и β_2 , от чего, между прочим, может зависеть колебание их значений; кроме того разделение элементов часто происходит сперва идя по горизонтальной линии, а затем уже под углом β_1 , что можно заметить на фиг. № 20. В последнем случае играет не маловажную роль распространяющаяся перед кончиком резца трещина, которая здесь идет большей частью горизонтально и в момент предшествующий скалыванию элемента достигает значительной величины.

При углах резанья $\alpha=75^\circ$ и $\alpha=85^\circ$, с увеличением толщины снимаемого слоя отдельные элементы ступенчатой стружки теряют связь между собой и после скалывания в направлении стороны угла β_1 , сходят с передней грани резца в виде отдельных кусочков металла. В остальном процесс протекает по прежнему. Иллюстрацией к этому может служить фиг. № 21. Стружка снята при $\delta=0,65$ мм. и $\alpha=85^\circ$; зафиксирован конечный момент образования элемента, предшествующий скалыванию. Предыдущий элемент отсутствует, так как он совершенно отделился. Ясно видно, как направление линии сдвигов в элементе под углом β_2 , так и угол β_1 наклона линий, ограничивающей деформации в стружке. Здесь же видно, что от кончика резца начинает распространяться горизонтальная трещина, которая при дальнейшем ходе процесса должна отделить образованный элемент.

При дальнейшем увеличении толщины снимаемого слоя „ δ “ и тех же углах резанья ($\alpha=75^\circ$ и $\alpha=85^\circ$), мы получали переход к совершенно иному типу стружки. Фиг. № 22 дает представление о стружке, снятой при $\delta=1,6$ мм. и $\alpha=86^\circ$. При этом мы видим, что здесь уже деформации скалывания не настолько ярко выражены, как на всех предыдущих стружках и особенно привлекает внимание чрезвычайно значительная трещина, идущая вперед горизонтально от кончика резца. Трещина эта иногда бывает чудовищных, по сравнению с глубиной резанья, размеров и придает стружке причудливый вид. Такой случай представлен на фиг. № 23 ($\delta=2,0$ мм. $\alpha=85^\circ$) и мы видим, что трещина здесь превышает глубину резанья примерно в 6—7 раз. Создается определенное впечатление, что стружка не скалывается, а отрывается резцом, потому этот тип можно назвать стружкой отрыва. Здесь, хотя и не так ясно, как у ранее рассмотренных, все же заметны направления углов β_1 и β_2 .

При еще более значительных величинах „ δ “ и тех же углах резанья, стружка отрыва получает еще более характерные черты. На фиг. № 24 („ δ “ = 2,2 мм.; $\alpha=75^\circ$) мы имеем такую стружку. Прежде всего, здесь уже нет резкой границы между деформациями в стружке и остальным металлом образца, иначе говоря, нет яркого выражения угла β_1 и значительные деформации в стружке постепенно сходят на нет. Кроме того, здесь линии сдвигов не имеют прямолинейного характера, а представляют собой ярко выраженные, почти правильные дуги концентрических окружностей. Трещина перед кончиком резца также имеет большую величину.

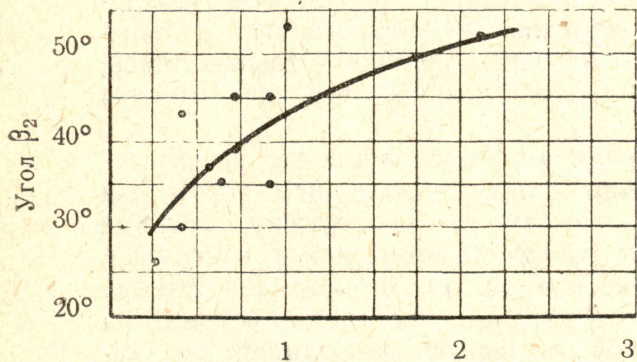
Такой же постепенный переход деформаций из стружки в образец и кривые линии сдвигов мы видим и на фотографии № 25 („ δ “ = 1,7 мм.; $\alpha=75^\circ$). Во всех ранее рассмотренных фотографиях стружки отрыва можно точно также заметить переход прямолинейных линий сдвигов в криволинейные.

В заключение рассмотрения фотографий приводим интересный снимок стружки, представляющей переходную ступень от типа скалывания к типу стружки отрыва. См. фиг. № 26 („ δ “ = 1,1 мм.; $\alpha=85^\circ$).

Здесь первый элемент получил характерную для стружки скалывания форму, у второго же имеются признаки стружки отрыва. Из этой фотографии можно заключить насколько значительные деформации происходят в такой стружке. Мы видим, что внутрь стружки со стороны резца распространяются ясно заметные трещины, которые в некоторых местах образуют пустоты; со стороны противоположной резцу нетрудно заметить, что значительные отрезки внешней поверхности образца в результате деформаций попали внутрь стружки.

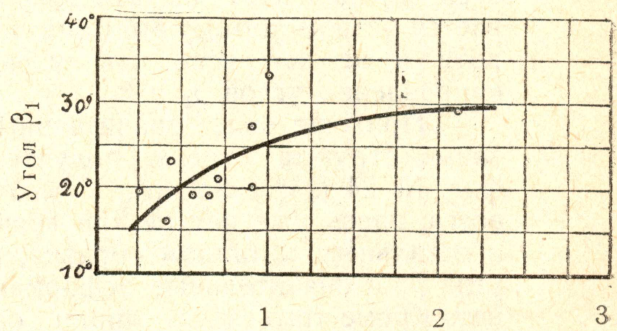
Вообще же если проследить характер образования, начиная с сливной и кончая стружкой отрыва, то станет ясным, что, если при сливной стружке мы имеем вполне установившийся закономерный процесс, при стружке скалывания процесс этот приобретает некоторую периодичность, не теряя закономерности, то в стружке отрыва ни закономерности, ни постоянства в течении процесса заметить нельзя: наряду с мелкими элементами подходящими по форме к элементам скалывания, мы в той же стружке отрыва имели элементы чудовищной величины с большим деформированным объемом металла, образованные в результате распространения перед кончиком резца трещины, превышающей во много раз величину глубины резанья „ δ “; наряду с наличием линий скалывания, имели значительные надрывы, трещины, смятия, в результате которых внешние части стружки вминаются внутрь и т. д. Все это, с одной стороны, показывает насколько усложняется процесс с увеличением угла резанья „ α “, с другой стороны служит достаточно хорошей иллюстрацией к тому, доказанному в настоящее время, положению, что с увеличением угла резанья увеличивается потребная сила на образование стружки постоянных размеров. Мы видим, что при этом неминуемо увеличивается как степень деформации, так и деформированный объем.

Угол резанья $\alpha = 75^\circ$



Толщина снимаемого слоя „ δ “ в мм.

Черт. № 26.



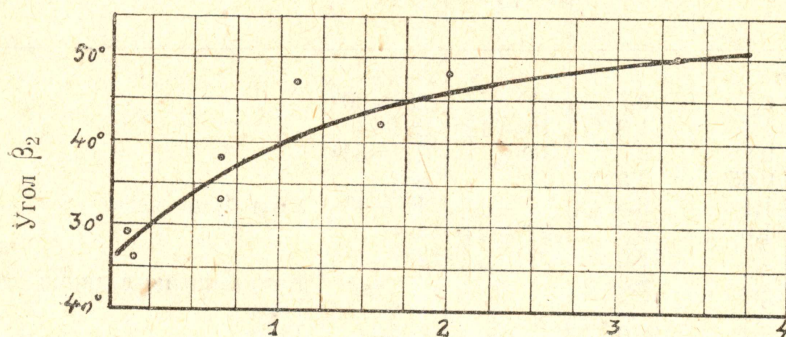
Толщина снимаемого слоя „ δ “ в мм,

Черт. № 27.

Измерения углов β_1 и β_2 при углах резанья $\alpha = 75^\circ$ и $\alpha = 85^\circ$, собранные нами в табл. № 15 и № 16, подтверждают увеличение деформированного перед резцом объема металла, так как мы получаем здесь меньшие углы β_1 , чем для таких же величин „ δ “ при $\alpha = 75^\circ$. Из этих же таблиц видно, что при больших углах резанья значения углов β_1 и β_2 испытывают, по причине упомянутых выше периодичности процесса (в случае стружки скалывания) и неравномерности (в случае стружки отрыва), довольно значительные колебания. В некоторых же случаях вообще не имеется возможности определить величины этих углов, либо

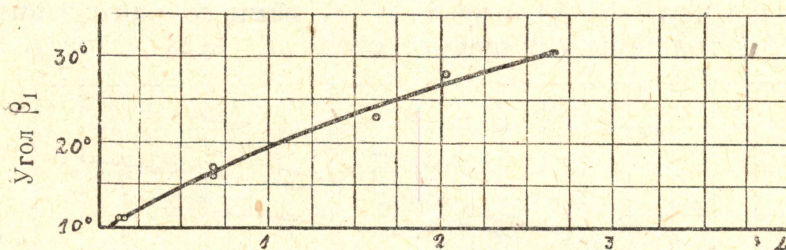
ввиду их неясности и постепенности перехода деформации из стружки в образец, либо ввиду наличия вместо прямолинейных линий сдвигов, описанных выше, криволинейных. Но все же, как из таблиц № 15 и

Угол резанья $\alpha = 85^\circ$



Толщина снимаемого слоя „ δ “ в мм.

Черт. № 28.



Толщина снимаемого слоя „ δ “ в мм.

Черт. № 29.

и № 16, так и из чертежей №№ 26—27, № 28—29, по ним составленным, можно заключить, что и здесь, также, как и в случае сливной стружки, с увеличением толщины снимаемого слоя „ δ “ заметно увеличиваются углы β_1 и β_2 , (о чем свидетельствует и увеличение отношения $\frac{\delta}{S}$).

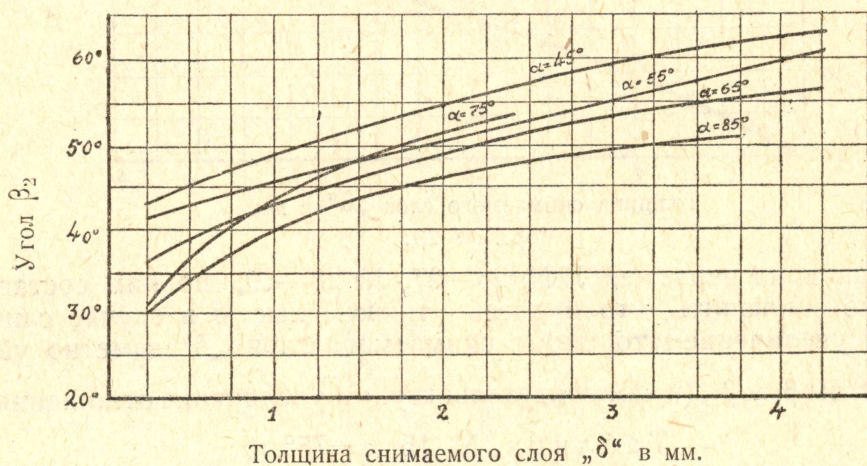
Таблица № 15. $\alpha = 75^\circ$.

№№ по порядку	№ образца	δ	s	β_1	β_2	Примечание
1	78	0,25	1,6	19°—20°	26°	
2	68	0,4	2,9	16°	30°	
3	8	0,4	2	22°—24°	42°—44°	
4	10	0,55	3	18°—20°	36°—38°	
5	81	0,7	3,1	20°—22°	38°—40°	
6	16	0,62	3,5	18°—20°	35°—36°	
7	63	0,7	2,5	—	44°—46°	Угол β_1 неясен
8	83	0,9	3,6	20°	34°—36°	Начало стружки
9	39	0,9	3,5	26°—28°	44°—46°	Угол β_1 не достоверен
10	33	1,0	4,0	32°—34°	52°—54°	
11	5	1,35	6,5	—	—	Криволинейные линии сдвигов
12	66	1,6	7,0	—	—	Тоже
13	6	1,7	5,5	—	—	Тоже
14	61	2,1	7,5	28°—30°	52°	
15	60	2,2	10,0	—	—	Криволинейные линии сдвигов
16	7	4,0	6,5	—	—	Начало стружки
17	27	4,2	11,0	—	—	

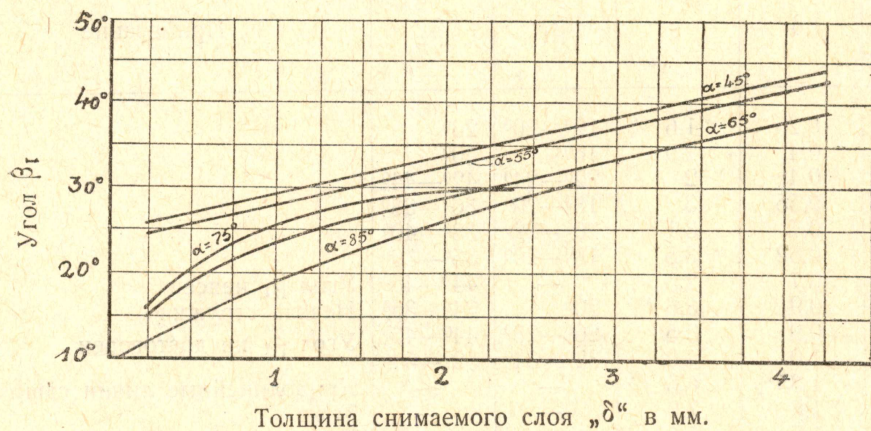
Таблица № 16. $\alpha=85^\circ$.

№№ по порядку	№ образца	δ	s	β_1	β_2	Примечание
1	88	0,1	0,7	11°	$28^\circ-30^\circ$	
2	89	0,13	1,3	$10^\circ-12^\circ$	26°	
3	93	0,65	3,5	16°	$32^\circ-34^\circ$	
4	96	0,65	4,5	17°	38°	
5	134	1,1	6,5	—	$46^\circ-48^\circ$	Угол β_1 не ясен
6	131	1,6	9,5	$22^\circ-24^\circ$	42°	
7	117	2,0	18,0	28°	48°	
8	130	2,3	6,3	—	—	Криволинейные линии сдвигов
9	119	2,4	7,0	—	—	Тоже
10	133	3,4	18,0	—	—	Тоже
11	135	3,4	8,8	—	$\infty 50^\circ$	
12	116	4,0	10,0	—	—	Криволинейные линии сдвигов

На графике черт. № 30 и черт. № 31 нами собраны зависимости углов β_1 и β_2 от толщины снимаемого слоя для всех углов α . Кривые



Черт. № 30.



Черт. № 31.

для всех α идут почти параллельно, углы β_1 и β_2 увеличиваются с увеличением „ δ “ и с уменьшением α . При этом изменение углов β_1 и β_2 с изменением „ δ “ много значительнее, чем с изменением „ α “.

При описании наших опытов мы сопоставляли результаты их с выводами ранее проведенных работ и отмечали, получаемые при этом разногласия. Наиболее существенным является то, что мы не получили подтверждения укоренившегося мнения о постоянстве угла сдвигов в стружке. Не говоря уже о том, что не подтвердились крайние мнения в этом вопросе (Hankins, Rosenhain и Styrney), предполагающие абсолютную неизменяемость угла сдвигов, проведенный эксперимент не дал соответствия и с более умеренными взглядами (Тиме, Афанасьев, Зворыкин), говорящими о неизменяемости угла сдвигов в пределах постоянного угла резанья. Можно даже сказать, что мы получили результаты прямо противоположные этому. Действительно графики черт. № 30 и № 31 не только свидетельствуют об отсутствии абсолютного постоянства, но и говорят о том, что скорее можно принять примерную независимость углов β_1 и β_2 от угла резанья „ α “, чем от толщины снимаемого слоя „ δ “, с изменением которой эти углы изменяются чрезвычайно сильно.

Если мы обратимся к известным нам теоретическим исследованиям вопроса, то увидим, что все они приходят к выводу о постоянстве угла сдвигов в стружке и о зависимости его лишь от угла резанья, т. е. к результатам, не соответствующим действительности. Здесь не является исключением и наиболее известная у нас теория проф. Зворыкина, преподносимая наряду с выводами проф. Тиме в технической литературе.

Не менее важным является то, что ни одна из теорий и экспериментальных работ не видит разницы между углом сдвигов в сливной стружке (β_2) и углом, под которым происходит разделение элементов в стружке скалывания (β_1), который в сливной стружке лишь ограничивает линии сдвигов. Точно также отсутствует представление о том, что в стружке, состоящей из отдельных элементов, образование этих последних происходит путем внутренних сдвигов под углом β_2 . Лишь один Усачев высказывал правильный взгляд на явление, но его мнение осталось не учтенным при последующих работах.

Таким образом существующее в настоящее время представление о процессе образования стружки в своих основных деталях не подтверждается экспериментом.

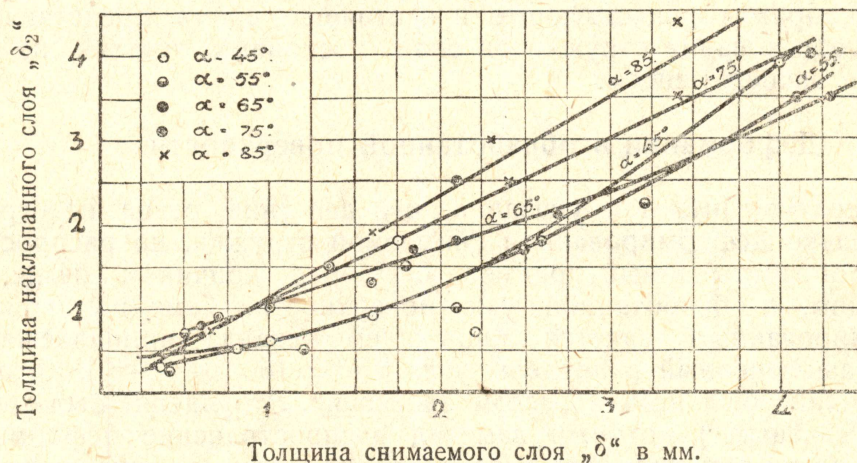
Деформации в обработанной поверхности.

В литературе имеются указания, что действие резца не ограничивается только деформированием снимаемой стружки, но распространяется и в обрабатываемый предмет как перед кончиком резца, так и под резцом, в обработанной уже поверхности. Тиме²⁾ утверждал, что деформированным является лишь объем металла принадлежащий стружке и заключенный в пределы угла β ($\beta = 180^\circ - \alpha - \beta_1$), который по этой причине был назван „углом действия“. Это мнение было опровергнуто Усачевым⁸⁾, который заметил распространение деформации в железе и стали вне пределов угла β , вперед перед резцом и вглубь металла под резцом, что однако относилось лишь к внешней боковой поверхности образца, которая будучи отшлифована и имея до обработки зеркально-блестящую поверхность, после прохода резца покрывалась рябью, тускнела, в местах претерпевших пластические формоизменения. Точно тоже указал Заднепровский⁹⁾ в отношении свинца и проф. Сокер⁵⁾ в отношении латуни и нитроцеллюлозы.

Однако, все это относилось к внешней боковой поверхности образца, могло создаваться за счет бокового выпучивания материала и не могло служить критерием распространения остаточных деформаций внутри образца.

Если мы воспользуемся результатами работы Herbert'a¹¹⁾, в которой он производил измерения твердости в различных местах снятой стружки, то можем получить указания по интересующему нас вопросу. На фиг. № 16 представлен заимствованный из указанной работы снимок, которым мы уже однажды пользовались. Из этой фотографии ясно видно, что далеко перед резцом, также как и под резцом, имеется значительное повышение твердости сравнительно с первоначальным ее значением для необработанного материала. Повышение твердости правда менее значительно, чем в снятой уже стружке, но все же имеется налицо и может быть следствием лишь происшедшего при обработке наклепа металла в результате воздействия со стороны резца. На указанной фотографии результаты несколько искажены и затемнены вследствие того, что не были предварительно уничтожены деформации от предыдущего прохода резца, на что указывает как состояние верхней поверхности образца, так и повышенная под ней твердость. Возможно, что поэтому автор не указывает в своей статье на описанное нами повышение твердости в обработанной поверхности. Во всяком случае, приведенная фотография показывает, что распространение деформации перед и под резцом имеет место не только на боковой поверхности но и в толще обрабатываемого предмета.

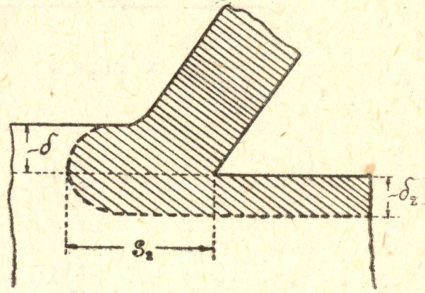
Мы задались целью определить величину распространения пластической деформации перед резцом и глубину распространения под резцом, при различных углах резанья, в зависимости от толщины снимаемого слоя. Для этого нами было использовано описанное уже выше травление по методу Fry, во второй его стадии, т. е. когда деформации вытравливаются в основном металле образца. Была взята часть шлифов, соответствующим образом протравлена и подвергнута измерению при десятикратном увеличении.



Черт. № 32.

Полученная после травления картина представлена на фиг. № 27 и № 28. Характерное потемнение указывает на присутствие пластически деформированного металла. Такое потемнение, как видно, распро-

страняется далеко за пределами угла β впереди резца и глубоко под резцом в обработанной уже поверхности. По таким шлифам измерялась толщина наклепанного слоя δ_2 и отстояние S_2 от кончика резца крайней точки деформированной области перед резцом. Результаты измерений собраны в таблицах №№ 17—21. Зависимость толщины наклепанного слоя от глубины резанья „ δ “ графически представлено на черт. № 32. Обозначения, употребляемые в таблицах понятны из схемы черт. № 33.



Черт. № 33.

Таблица № 17

 $\alpha = 45^\circ$

№№ по порядку	№ об-разца	δ	δ_2	S_2
1	74	0,35	0,3	1,5
2	73	0,8	0,5	2,6
3	36	1,0	0,6	3,5
4	101	1,6	0,9	5,0
5	106	1,75	1,8	3,5
6	105	2,2	1,2	6,8
7	107	4,0	3,8	16,5

Таблица № 18

 $\alpha = 55^\circ$

№№ по порядку	№ об-разца	δ	δ_2	S_2
1	79	0,4	0,25	1,5
2	75	0,5	0,7	2,7
3	4	1,2	0,5	1,9
4	24	1,8	1,5	6,0
5	1	2,1	1,0	3,5
6	166	2,5	1,7	8,0
7	2	2,6	1,8	—
8	3	3,2	2,25	8,5
9	23	4,1	3,5	12,5

Таблица № 19

 $\alpha = 65^\circ$

№№ по порядку	№ об-разца	δ	δ_2	S_2
1	67	0,6	0,8	4,2
2	113	1,85	1,7	7,0
3	137	2,1	1,8	8,5
4	114	2,7	2,1	9,0
5	17	4,3	3,5	14,0

Таблица № 20

 $\alpha = 75^\circ$

№№ по порядку	№ об-разца	δ	δ_2	S_2
1	63	0,7	0,9	4,5
2	33	1,0	1,0	5,5
3	5	1,35	1,5	8,0
4	66	1,6	1,3	7,0
5	61	2,1	2,5	9,5
6	27	4,2	4,0	—

Таблица № 21

$\alpha = 85^\circ$

№№ по порядку	№ образца	δ	δ_2	S_2
1	93	0,65	0,75	3,6
2	131	1,6	1,9	11,5
3	130	2,3	3,0	12,5
4	119	2,4	2,5	10,0
5	133	3,4	4,2	23,5
6	135	3,4	3,5	11,0

Из приведенных таблиц и графиков видно, что толщина наклепанного слоя „ δ_2 “ растет с увеличением глубины резанья и с увеличением угла резанья и достигает при больших стружках очень значительной величины, превосходя по своему значению при больших углах резанья даже глубину резанья. Точно также, только еще быстрее, растет с увеличением δ и α объем наклепанного металла, расположенный впереди резца и снимаемой стружки.

Таким образом, деформация перед резцом выходит далеко за пределы угла β и „угол действия“, как ограничивающий распространение воздействия резца на металл, теряет свое специфическое значение.

Затронутый вопрос является интересным в отношении распространения деформаций под резцом в обработанной поверхности по той причине, что в новейшей технической литературе встречаются определенные указания на то, что предварительная механическая обработка значительно понижает предел усталости металла.

В настоящее время предел усталости получает все большие права гражданства как критерий пригодности металла для того или иного практического применения. Понижение его вследствие предварительной механической обработки резаньем объясняют обыкновенно тем, что на обработанной поверхности остаются более или менее значительные риски и трещинки, которые при последующей службе изделия, при повторных переменных нагрузках дают начало трещинам усталости. Мы приводим таблицу, характеризующую изменение предела усталости в зависимости от предварительной обработки²⁹⁾ у стали с 0,49% С.

СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ	Предел усталости кг./см. ²	Уменьшение в % по отношению к тонко- полированной
Тонко полированная	3500	—
Стандартная	3400	2,9
Шлифованная	3200	8,6
Чисто обточенная	3000	14,3
Грубо обточенная	2900	17,2

С другой стороны имеются указания, что наклеп металла точно также достаточно сильно понижает предел усталости.

Можно высказать предположение что понижение предела усталости после обработки резаньем является следствием не только наличия оставшихся трещин, но и присутствия поверхностного более или

менее значительного наклепанного слоя металла, появившегося в результате предварительной обработки и отличающегося по своим механическим качествам от основного металла. Что наклепанный слой действительно отличается по своим свойствам от основного металла, видно по приведенной ранее фотографии № 16. В то время как твердость (по Герберту) основного металла 19,9, твердость в наклепанном слое достигает 28,4. Вместе с изменением твердости, естественно, изменяются и остальные механические свойства.

Нами был проведен следующий опыт.

Из предварительно простроганной с большой глубиной резанья поверхности были приготовлены три образца для испытания на разрыв размерами $120 \times 6 \times 0,7$ мм. Точно такие же три образца были изготовлены из того же куска железа, но из поверхности не наклепанной резаньем. Как те, так и другие готовились совершенно одинаково: осторожно выпиливались ножовкой, опиливались затем личной пилой и шлифовались шкуркой. Таким образом влияние наклепа при изготовлении должно было отразиться на тех и других одинаково и разница в механических свойствах, выявленная при последующем испытании, могла быть отнесена лишь за счет предварительного наклепа при строгании.

Испытания на разрыв дали примерно одинаковую величину временного сопротивления для тех и других образцов, но различные величины относительного удлинения. Результаты собраны в табл. № 22.

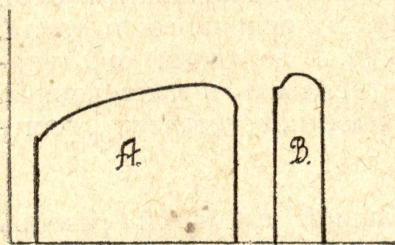
Таблица № 22.

№№ по порядку	ХАРАКТЕРИСТИКА	Врем. сопротивл. в кг./мм. ² Kz	Относительное удлинение в %, измеренное на длине 10 мм.								Общее относительное удлинение на длине 80 мм.	Примечание
			Номер деления длиной 10 мм.									
			1	2	3	4	5	6	7	8		
1	Не деформированы.	35,0	11	12	12,5	14	22,5	49	12	7	17,5%	Деление, на котором произошел разрыв подчеркнуто.
2		34,0	10	16	16	13,5	13,5	19	45	21	19,3%	
3		33,8	24	17	14	12,5	14	20	49	21	21,3%	
4	Наклепаны путем строгания.	34,2	52,5	12	8	5,5	5,5	4,5	4	4	12,0%	
5		40,0	0	0	1	2	4	8	16	45	9,5%	
6		39,0	2	1	0,5	1	1,5	0	4	27	4,6%	

Из таблицы видно, что образцы приготовленные из слоя предварительно наклепанного резаньем, дали много более низкую величину относительного удлинения, чем остальные, причем это удлинение почти все сосредоточено в месте разрыва, в остальных же делениях образца очень незначительно. В образцах ненаклепанных общее удлинение много больше и более равномерно распределено по всей длине образца.

Для сравнения приводим две диаграммы (см. черт. № 34) снятые во время растяжения; одна (А) для образца не наклепанного резаньем (№ 3 в таблице № 22), другая (В) для образца наклепанного резаньем (№ 6 в табл. 22).

Таким образом несомненно влияние наклепа резаньем на механические свойства образцов. Нужно только отметить, что и ненакле-



Черт. № 34.

паные образцы показали довольно низкие, в сравнении с требуемыми от нормального железа, величины относительного удлинения, что по всей вероятности, объясняется отчасти тем, что ввиду малой толщины образцов (0,7 мм), сказалось влияние обработки при приготовлении образцов. Были приготовлены из того же железа еще два образца сечением $2,5 \times 6$ мм., которые перед разрывом были подвергнуты отжигу. Они дали нормальную величину относительного удлинения 2,5% и 35%.

Итак, грубая обработка резаньем создает на обработанной поверхности наклепанный слой, значительно отличающийся по своим механическим качествам.

Кончая на этом изложение резюмируем кратко получен. результаты:

Краткое резюме.

I. В случае резанья вязкого материала, все стружки делятся по их виду на сливные и разделенные на элементы. Последние, в свою очередь, делятся на стружки скалывания и отрыва.

II. Продольная усадка стружки изменяется с изменением толщины снимаемого слоя, угла резанья, скорости резанья, величины и направления действующих на стружку сил. Усадка увеличивается с увеличением угла резанья, с уменьшением толщины снимаемого слоя. Кривая зависимости усадки от скорости имеет максимум. С применением смазки усадка уменьшается.

III. Причиной продольной усадки является не только последовательные сдвиги в стружке, но и сжатие ее и, возможно, изгиб, присутствие которого в стружке несомненно.

IV. Образование сливной стружки происходит путем последовательных сдвигов металла под определенным углом (β_2) к направлению движения резца. Направление сдвигов не совпадает с направлением, идущим от кончика резца к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку. Сдвиги происходят одновременно во многих параллельных плоскостях.

V. Образование отдельных элементов стружки разделенной на элементы происходит подобно образованию сливной стружки, т. е. путем сдвигов металла под углом β_2 . Разделение стружки на элементы происходит в направлении от кончика резца к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку, под определенным углом (β_1) к направлению движения резца. В этом направлении (под углом β_1) в сливной стружке никаких деформаций не происходит.

VI. Как угол β_1 так и β_2 величины отнюдь не постоянные. Они изменяются очень значительно с изменением толщины снимаемого слоя, менее значительно с изменением угла резанья и скорости резанья. При всех прочих постоянных условиях, изменение величины и направления действующих на стружку сил вызывает изменение углов β_1 и β_2 . Изменение углов β_1 и β_2 связано и идет параллельно с изменением коэффициента продольной усадки стружки.

VII. Угол β_2 всегда больше угла β_1 , причем разность между ними сохраняет примерно постоянную величину.

VIII. Причиной образования неровностей (зазубрин) на стороне соприкосновения стружки с резцом и на обработанной поверхности является значительная сила трения между стружкой и резцом и наличие распространяющейся перед кончиком резца трещины.

IX. Неровности на обработанной поверхности тем больше, чем больше угол резанья и толщина снимаемого слоя.

X. Непременным условием возможности образования нароста на резце (кромочного придатка), является наличие зазубрин на стружке, одна из которых, в силу значительного трения между стружкой и резцом, отрываясь от стружки приваривается к резцу и превращается в нарост. Нарост, таким образом, образуется из металла, принадлежащего стружке.

XI. Пластическая деформация имеет место не только в пределах „угла действия“ β , но распространяется далеко впереди резца и под резцом вглубь обрабатываемого материала. На обработанной поверхности создается деформированный слой металла, отличающийся по своим механическим качествам от основного металла. Глубина распространения деформации под резцом и перед резцом увеличивается с увеличением угла резанья и толщины снимаемого слоя.

XII. С увеличением угла резанья увеличивается как степень деформации металла, так и деформированный перед резцом объем металла.

Все выводы относятся к случаю железной стружки.

В заключение приносим глубокую благодарность за помощь и полезные советы профессору Т. И. Тихонову, а также всем, так или иначе способствовавшим проведению нашей работы.

Опыты производились в лаборатории технологии металлов и металлографии Сибирского Технологического Института.

Литература, на которую в работе имеется ссылка.

1. Experiences sur la resistance utile... par Coquilhat, Paris 1848—1849.
2. И. Тиме. Сопротивление металлов и дерева резанью. СПб. 1870.
3. Афанасьев.—Определение усилия и его работы при образовании стружек. Известия Петербургского Технологического Института. 1883—4 год, стр. 265.
4. „Mémoire sur le rabotage de métaux“ par M. Tresca. 1873.
5. К. А. Зворыкин проф.—Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек. 1893.
6. Погоржельский.—Бюллетень Политехнического Об-ва. 1907 г., стр. 179.
7. Соколов.—О форме обдирочных резцов. Известия Донского Политехнического Института. 1914 г., стр. 1.
8. Усачев.—Явления, происходящие при резании металлов. Известия Петроградского Полит. Ин—та. 1925 г., стр. 259.
9. Заднепровский.—Деформация и сопротивление металлов строганию. Известия Донского Полит. Ин—та. 1918 г.
10. Klopstock.—Untersuchung der Dreharbeit. 1926 г. Klopstock. Werksfaktstechnik 1923 г.
11. Herbert.—E. G. Maschinenbau. 1927—s. 991.
12. W. Rosenhain and Sturney.—The Proceedings of the Instit. of Mech. Eng. 1925. N 2 p. 141.
13. Кирпичев.—Оптическое изучение упругих деформаций. Вестник О-ва технологов. 1913 г., стр. 1.
14. Coker C. G.—Proc. I. Mech. Eng. 1922. p. 567.
15. Coker C. G.—Proc. I. Mech. Eng. 1925. p. 357.

16. Зайцев.—Оптический метод изучения напряжений. 1927 г., стр. 133.
17. Kurrein—Osterr. Wochenschr. f. öffentliche Baudienst. Sept. 1905.
18. Ad. Fry. Stahl und Eisen. 1921 N 32.
19. I. D. Jevvons.—The Journal of Iron and Steel Inst. 1925. V. CXI. E. W. Fell. Cornege Schol. Met. 16. (1927). S—101/29. Stahl und Eisen. 1928. S—1926. Kraftwirkung im Stahl.
20. Добровидов и Розенберг. Выявление пластических деформаций в железе. Известия СТИ, том 48 (1928).
21. Archiv für das Eisenhüttenwesen 1928 S—511. Die Wichtigsten Eigenschaften und die Theorie der Fließfiguren Von Itaro Takaba und Katumi Okuda.
22. Саввин—Резанье металлов и инструменты, стр. 4. 1923 г.
23. Rejtö. Einige Prinzipien der theoretischen mechanischer Technologie der Metalle. 1927. S—441.
24. Kronenberg. Grundzuge der Zerspanungslehre. 1927. S.
25. Hankins.—Proced. Inst. Mech. Eng. 1923.
26. Саввин.—Охлаждение резца.
27. Тэйлор.—Искусство резать металлы, стр. 49. 1909 г.
28. Herbert. Engineering. 1927. Орга-Информация. 1928. № 5 стр. 142. Температура резания.
29. Н.Т.К. Н.К.П.С. Выпуск № 68. Методика механических испытаний металлов. 1928 г., стр. 62.

ОПЕЧАТКИ И ПРОПУСКИ

в статье А. М. РОЗЕНБЕРГА

„Экспериментальное исследование процесса образования
металлической стружки“.

(В „Известиях СТИ“).

НА П Е Ч А Т А Н О

С Л Е Д У Е Т

Стр. 33. 15 строчка сверху

...изменения „ δ “ мы совершенно...

...изменения с изменением величины „ δ “ мы совершенно...

Стр. 35. Под чертежом № 23 ПРОПУЩЕНО:

„Скорость резанья V в мтр. в мин.“

Сбоку у чертежа ПРОПУЩЕНО:

$$K_0 = \frac{l_1}{l_0}$$

Стр. 36. Строчка 5 снизу, столбец IV

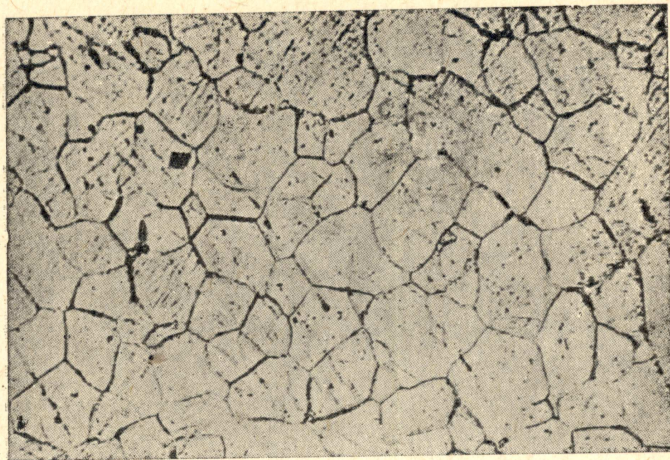
4,61

14,61

Стр. 52. Сбоку у черт. № 32

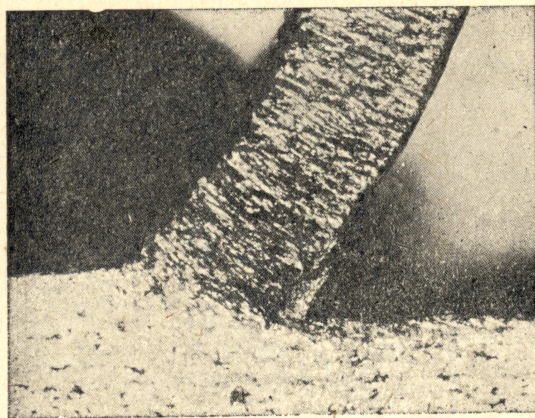
толщина наклепанного
слоя „ δ_2 “

толщина наклепанного слоя
„ δ_2 “ в мм.



Фиг. 1.

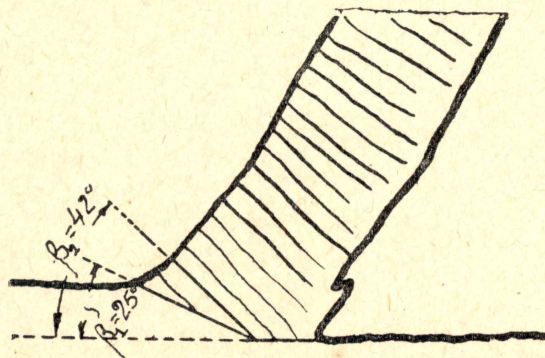
× 100



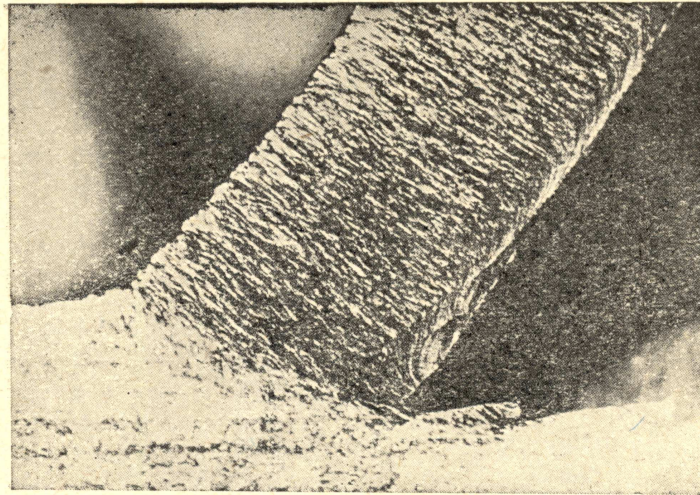
Фиг. 2.

× 19

(Образец № 9; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 0,4$ мм.).



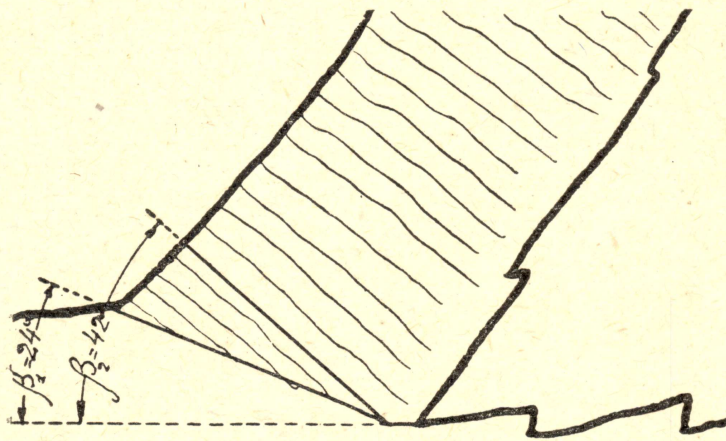
Фиг. 2-а.



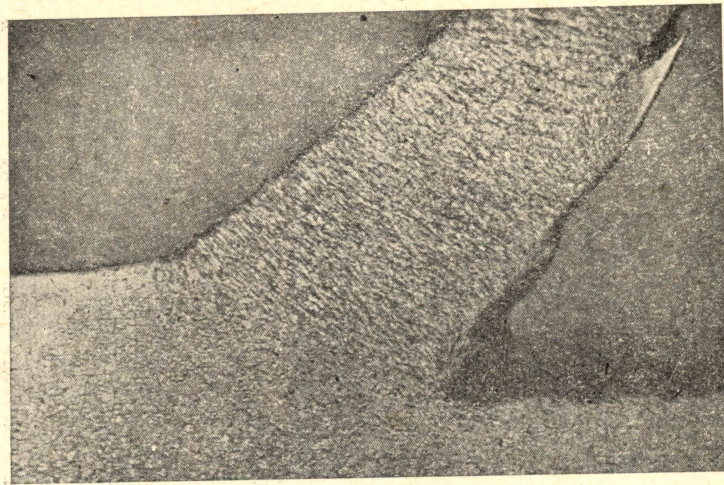
Фиг. 3.

× 20

(№ 153; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 0,8$).



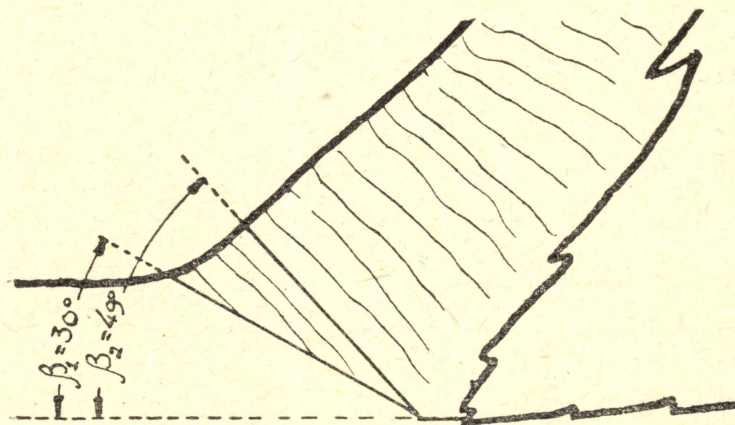
Фиг. 3-а.



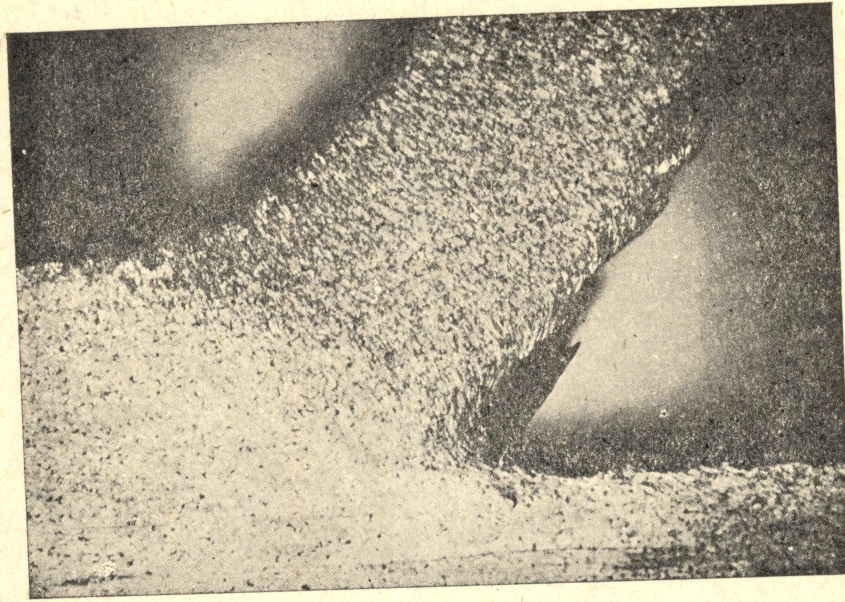
Фиг. 4.

× 8

(№ 1; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 2,1$ мм.).



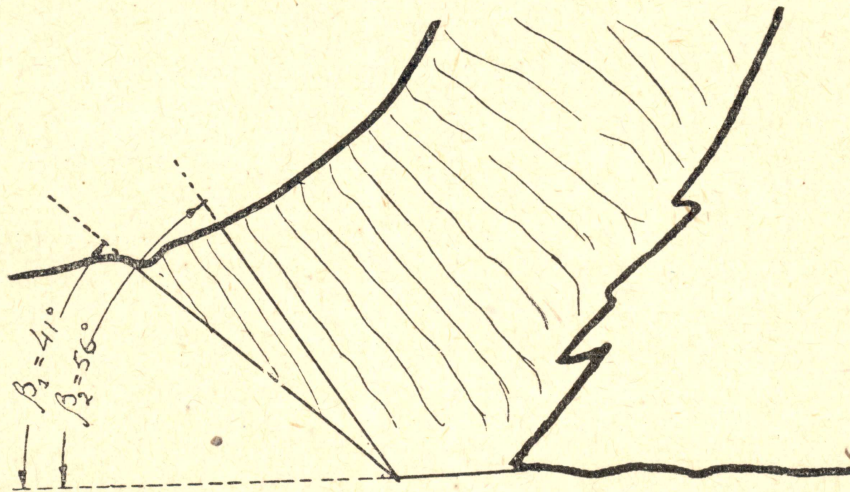
Фиг. 4-а.



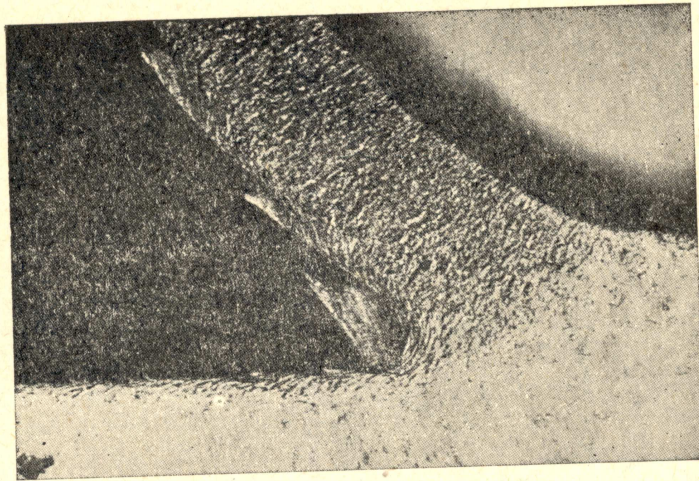
Фиг. 5.

× 8

(№ 3; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 3,2$ мм.).



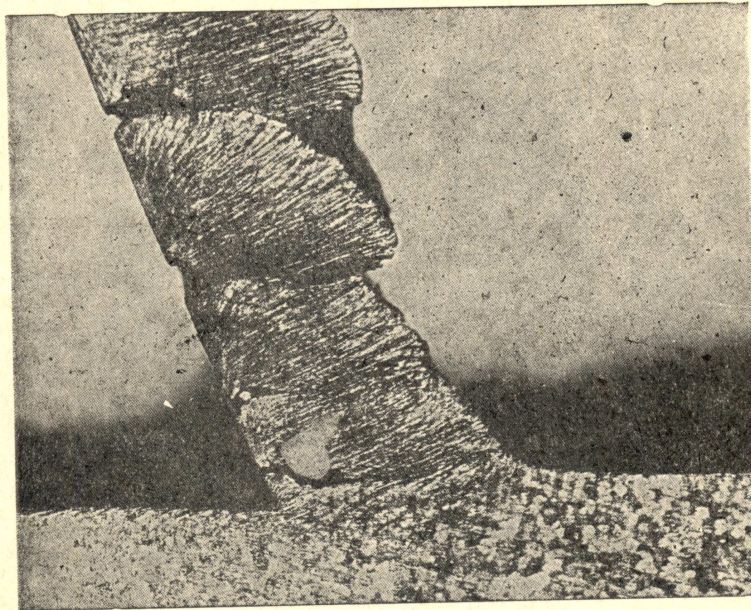
Фиг. 5-а.



Фиг. 6.

(№ 86; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 1,15$ мм.)

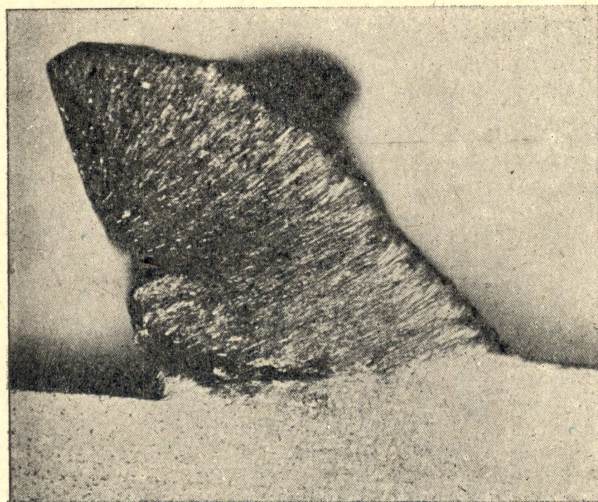
× 8



Фиг. 7.

(№ 87; $\alpha = 65^\circ$; $\delta = 0,26$ мм.)

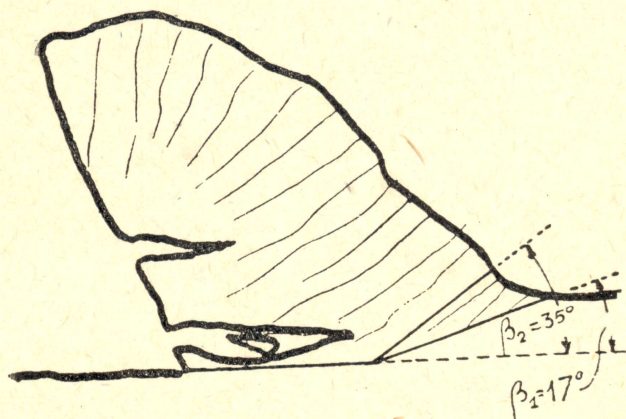
× 19



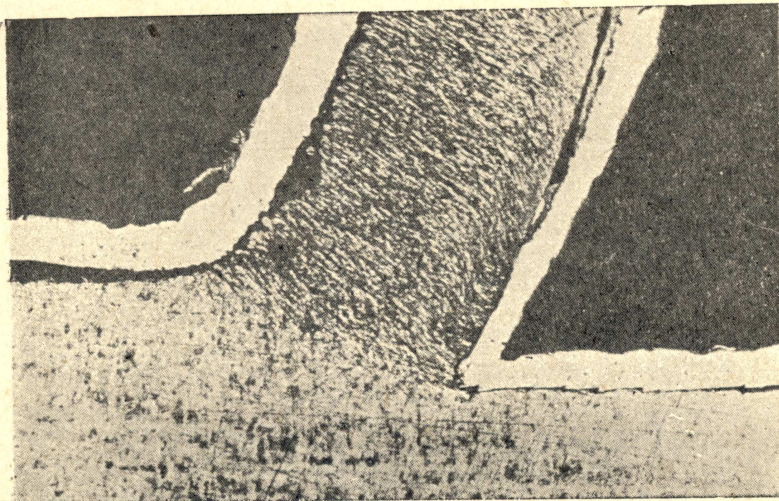
Фиг. 8.

× 12

(№ 38; $\alpha = 65^\circ$; $\delta = 0,6$ мм).



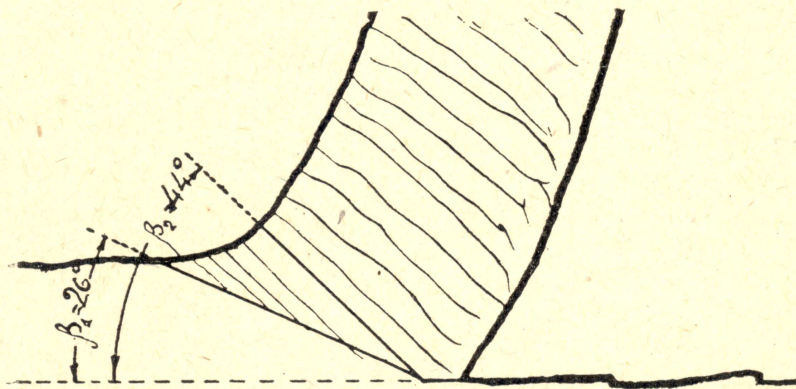
Фиг. 8 а.



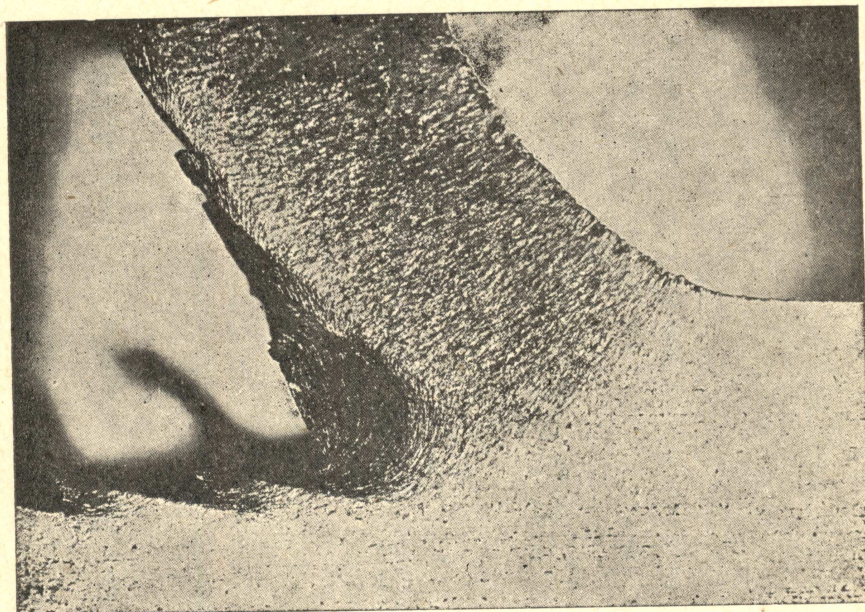
Фиг. 9.

× 12

(№ 90; $\alpha = 65^\circ$; $\delta = 0,95$ мм.)



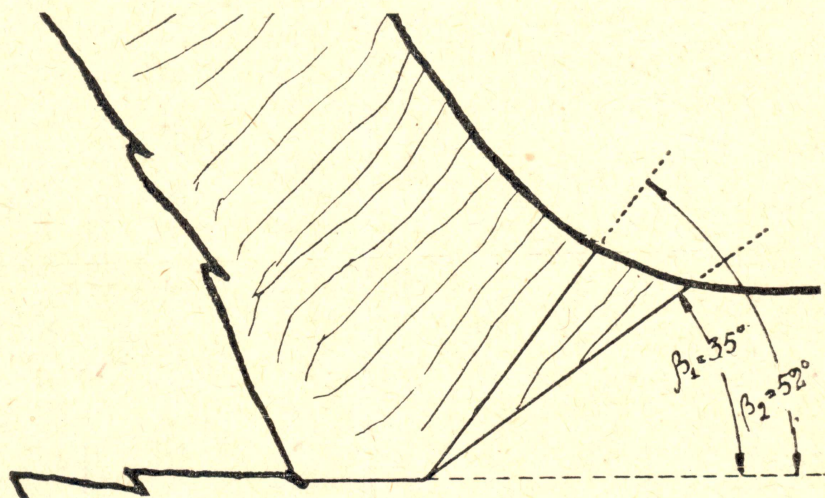
Фиг. 9-а.



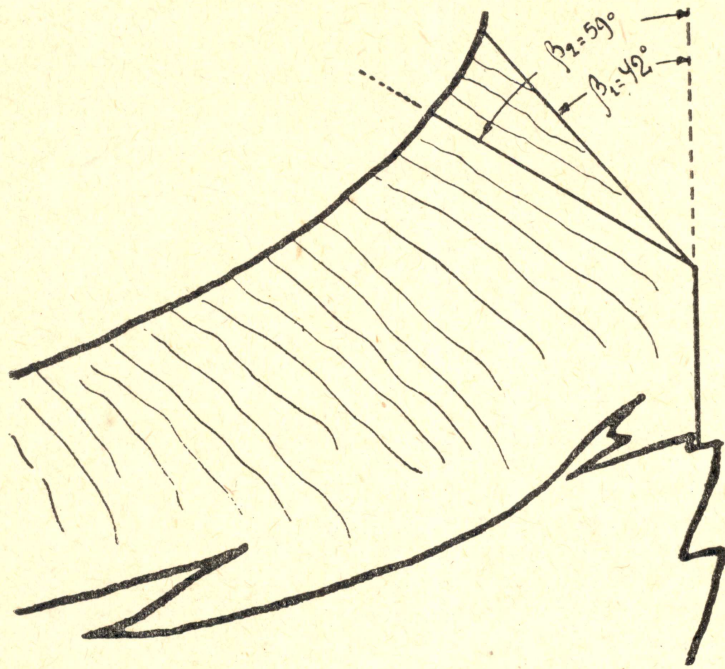
Фиг. 10

× 8 1 30

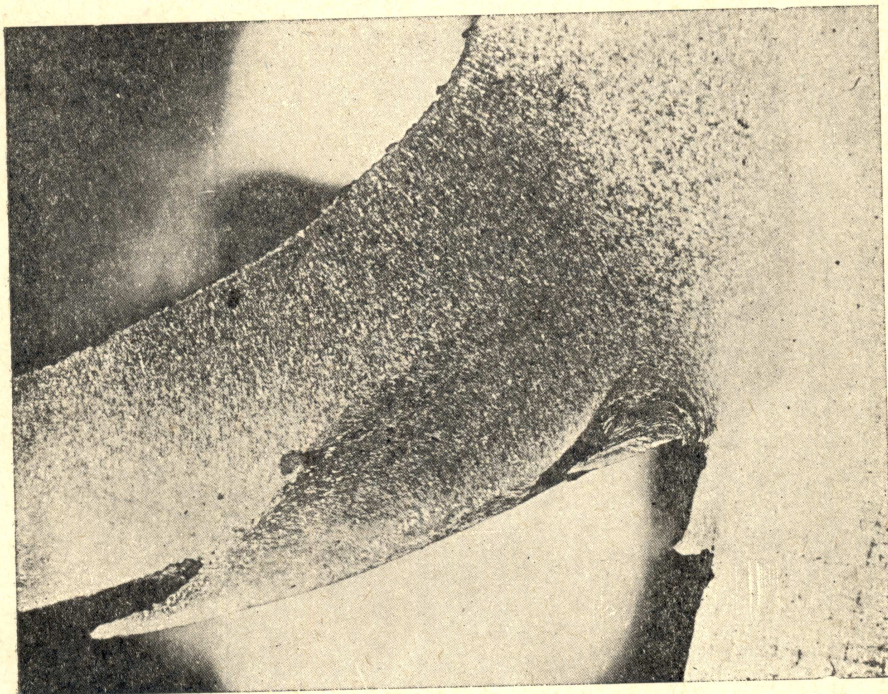
(№ 114; $\alpha = 65^\circ$; $\delta = 2.7$ мм.).



Фиг. 10-а.

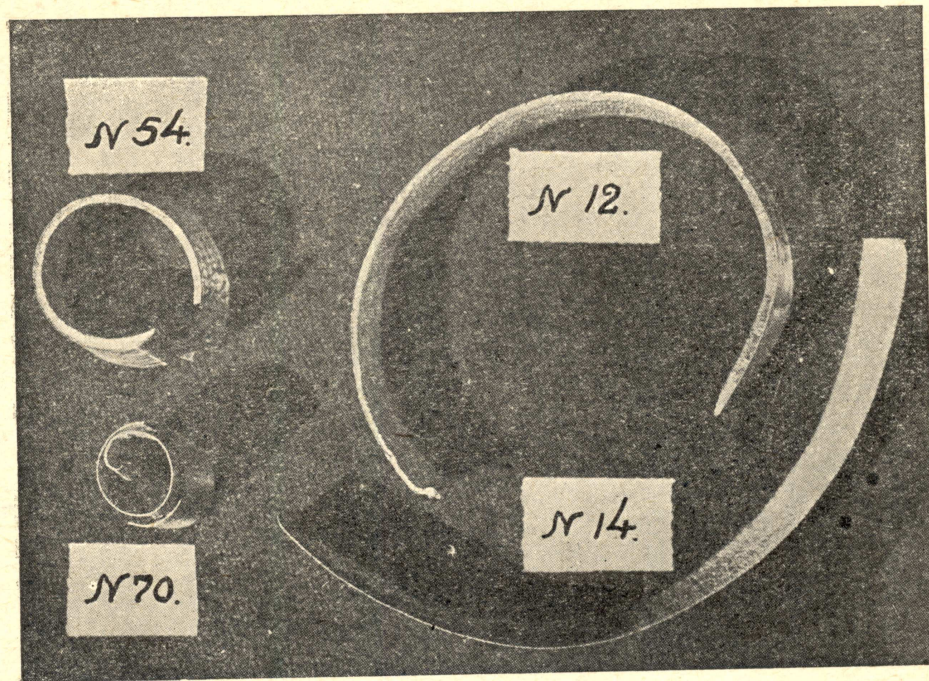


Фиг. 11-а.

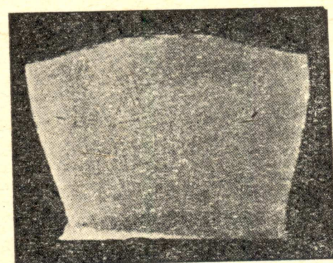


× 6

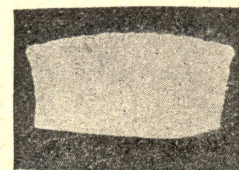
Фиг. 11.
(№ 17; $\alpha = 65^\circ$; $\delta = 4,3$ мм.)



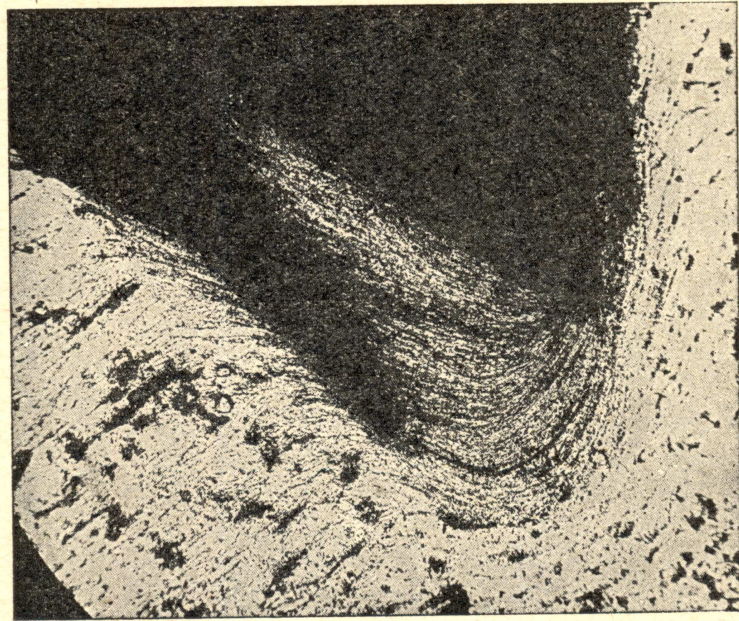
Фиг. 12.



Фиг. 13.

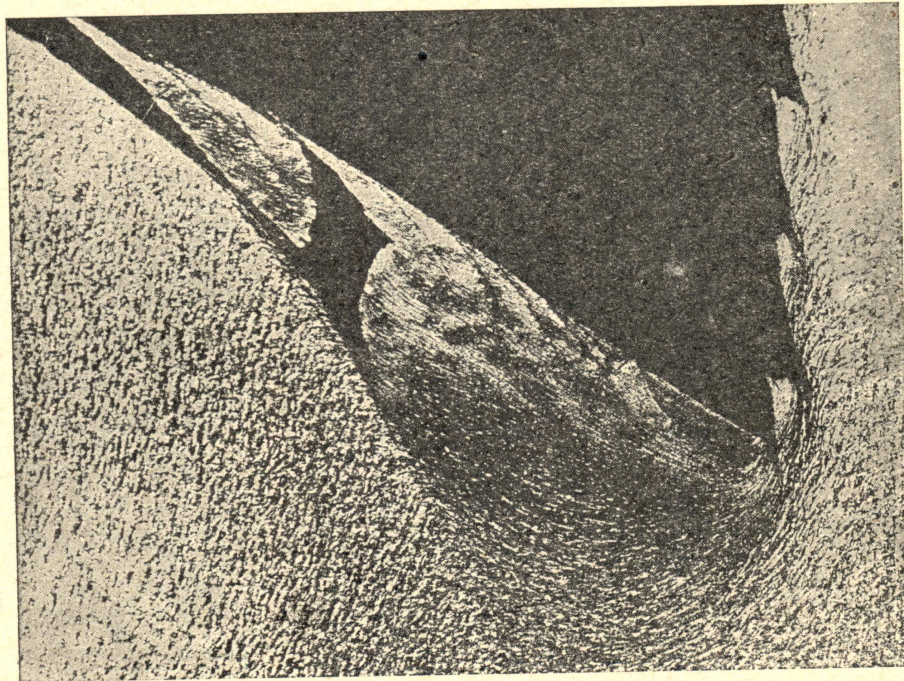


× 4.



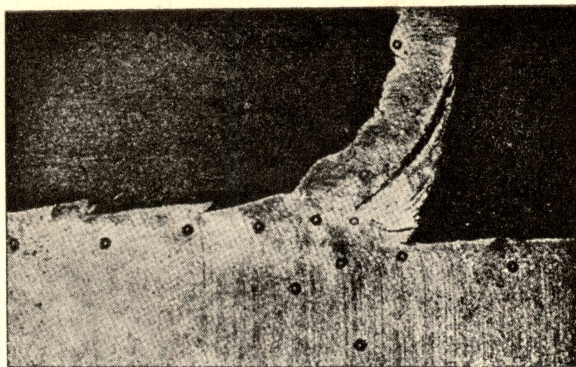
× 60

Фиг. 15.

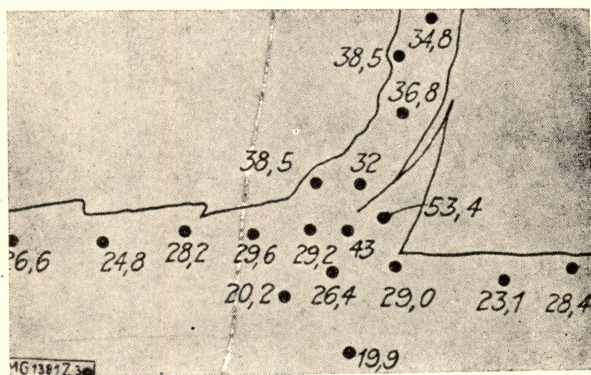


× 20

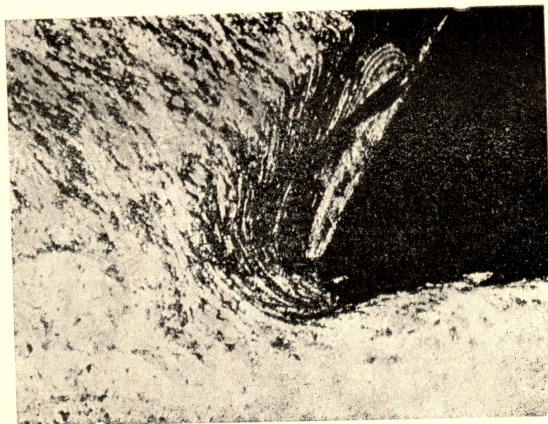
Фиг. 14. (№ 23; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 4,1$ мм.)



Фиг. 16-а.

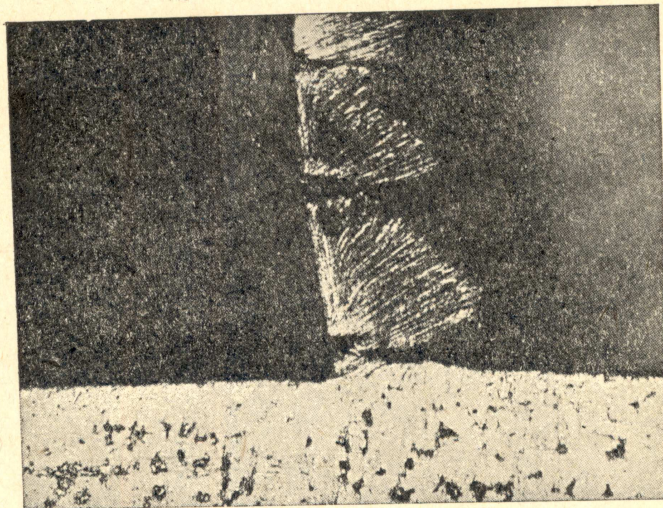


Фиг. 16-б.



Фиг. 17.

× 22



Фиг. 18.

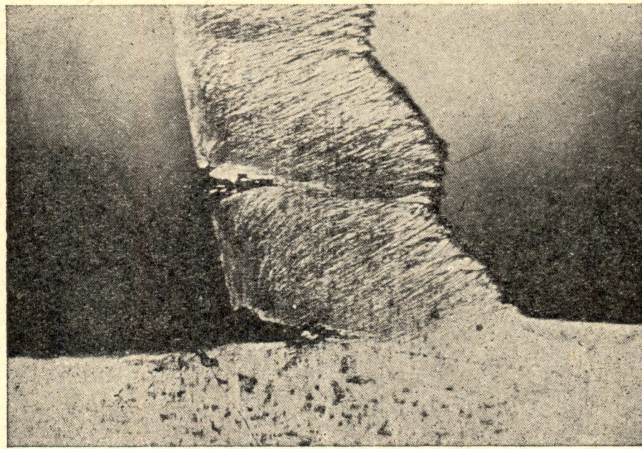
× 22

(№ 88; $\alpha = 85^\circ$; $\delta = 0,1$ мм.)

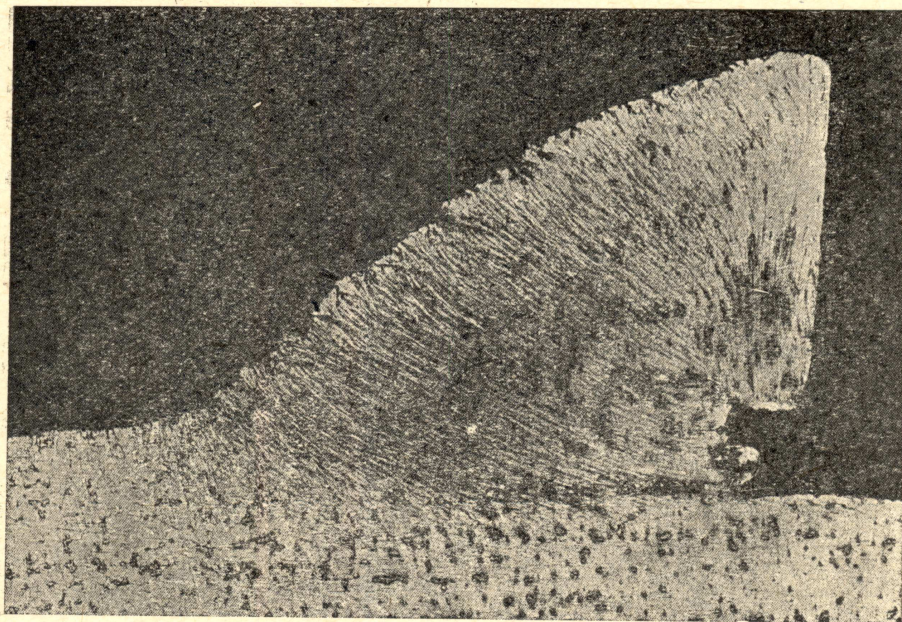


Фиг. 19.

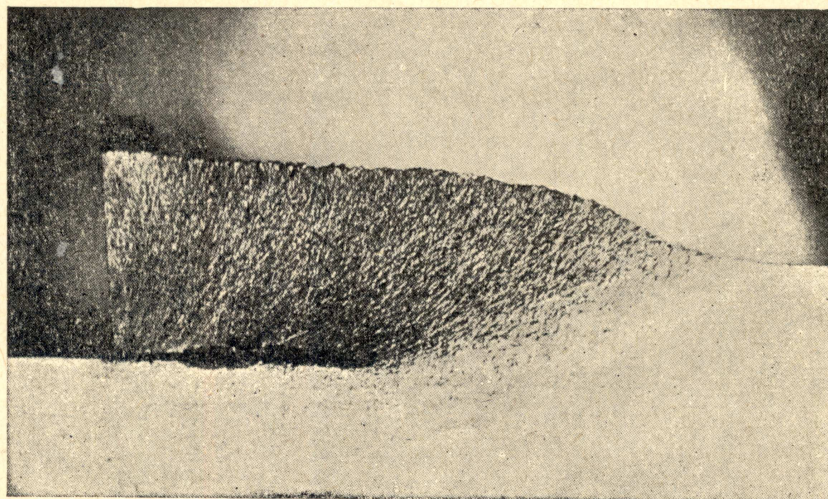
× 0,8



Фиг. 20. × 12
(№ 68; $\alpha = 75^\circ$; $\delta = 0,4$ мм).



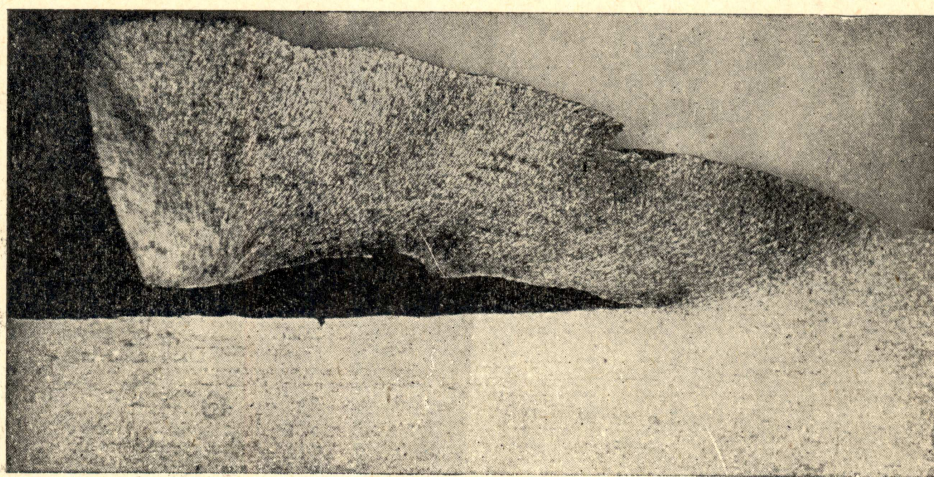
Фиг. 21. × 18
(№ 96; $\alpha = 85^\circ$; $\delta = 0,65$ мм).



Фиг. 22.

(№ 131; $\alpha = 85^\circ$; $\delta = 1,6$ мм.).

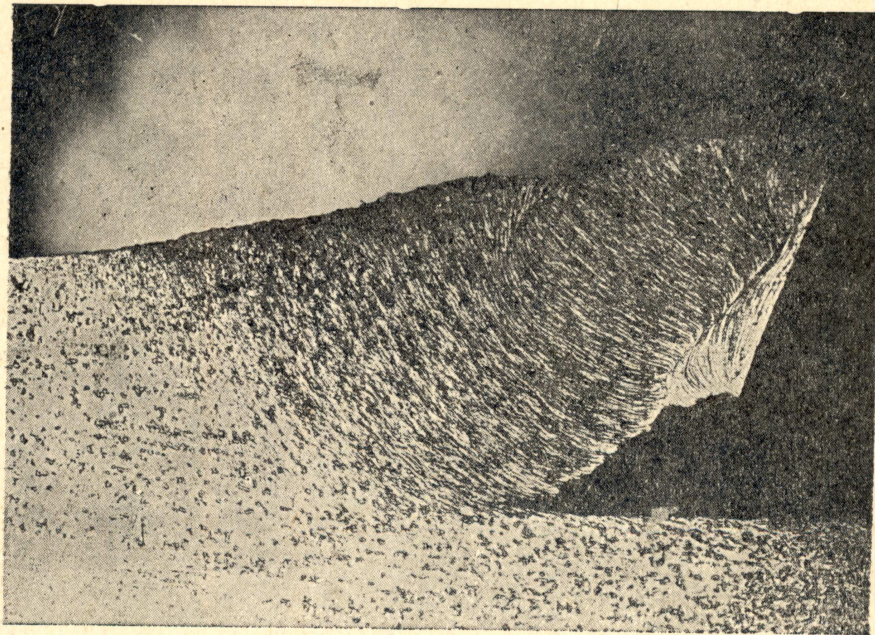
× 8



Фиг. 23.

(№ 117; $\alpha = 85^\circ$; $\delta = 2$ мм.).

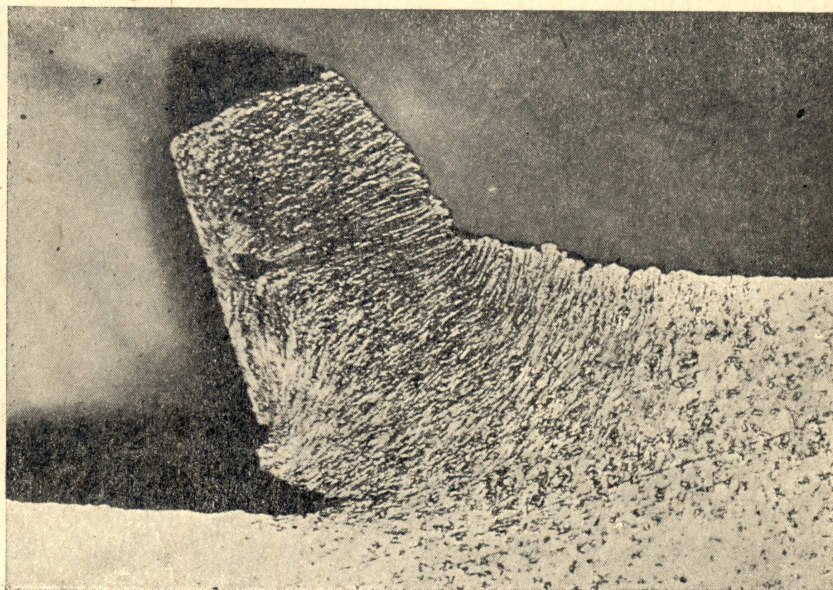
× 5



Фиг. 24.

(№ 60; $\alpha = 75^\circ$; $\delta = 2,2$ мм.).

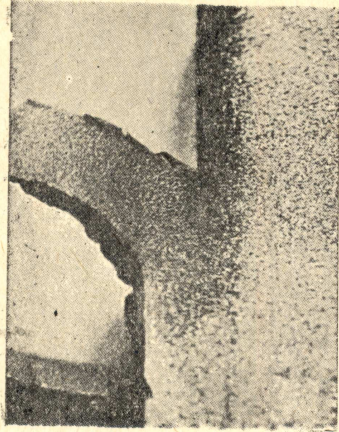
× 8



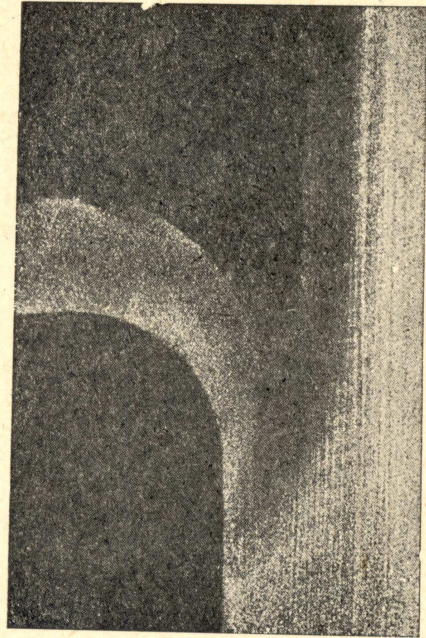
Фиг. 25.

(№ 6; $\alpha = 75^\circ$; $\delta = 1,7$ мм.).

× 8



Фиг. 27. $\times 2,5$
(№ 3; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 3,2$ мм.).



Фиг. 28. $\times 2$
(№ 23; $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 4,1$ мм.).



Фиг. 26. $\times 12$
(№ 134; $\alpha = 85^\circ$; $\delta = 1,1$ мм.).