

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ ПЛАСТИЧНОГО МЕТАЛЛА

А. М. РОЗЕНБЕРГ и А. Н. ЕРЕМИН

Общие соображения

Влияние скорости на процесс резания можно рассматривать с различных точек зрения.

При очень низких скоростях резания изменение скорости непосредственно влияет на коэффициент трения между стружкой и резцом.

Повышение скорости резания здесь обычно сопровождается повышением коэффициента трения. Это является результатом того, что при повышении скорости резания сокращается время контакта стружки с передней гранью резца, благодаря чему уменьшается проявление адсорбционного и окисляющего эффектов окружающей среды, обычно снижающих коэффициент трения. При повышении скорости перемещения стружки по резцу процесс трения осуществляется между поверхностями, менее покрытыми адсорбированными пленками или пленками окислов, т. е. более чистыми. Процесс трения при этом более приближается к процессу сухого трения, что всегда связано с повышением коэффициента трения. Это особенно заметно при очень низких скоростях резания (микроскоростях), где повышение скорости не сопровождается заметным повышением температуры, и снижение адсорбционного эффекта проявляется в чистом виде. Повышение скорости в этой зоне через повышение коэффициента трения вызывает увеличение усадки стружки, степени ее деформации, повышение напряжения в зоне деформации и в результате совместного влияния увеличенной усадки и напряжения неизбежно приводит к увеличению сил резания. Повышение напряжения и сил резания здесь не является результатом непосредственного влияния скорости деформации, а лишь следствием повышения коэффициента трения и вызванного этим увеличения степени пластической деформации стружки.

В том диапазоне скоростей резания, где увеличение скорости резания влечет за собой повышение температуры как в зоне деформации, так и в зоне трения стружки по резцу, скорость деформации может влиять на процесс резания двояким образом. С одной стороны, повышение температуры в зоне трения стружки по резцу вызывает изменение коэффициента трения, протекающее по вполне определенной закономерности, что в свою очередь оказывает влияние на степень деформации, упрочнение и напряжение в зоне деформации стружки, на процесс формирования и геометрию нароста и связанное с этим изменение опять-таки степени деформации стружки и напряжения в зоне деформации.

С другой стороны, повышение температуры в зоне деформации может влиять в направлении снижения напряжений, если времени действия тепла окажется достаточно хотя бы для частичного протекания процесса отдыха в деформируемом металле.

Так, например, при резании стали повышение температуры в результате повышения скорости резания сопровождается изменением коэффициента тре-

ния по кривой, имеющей максимум. До этого максимума повышение температуры связано с появлением и постепенным вырождением нароста, с первоначальным снижением степени деформации стружки и снижением напряжения, а затем с повышением степени деформации стружки и напряжения. За максимальным значением коэффициента трения дальнейшее повышение скорости и температуры вызывает уменьшение коэффициента трения, степени деформации и напряжения.

Кроме этих изменений напряжения и сил резания, связанных с изменением степени деформации стружки, в процессе резания, как и в процессах иных видов деформирования, должно существовать непосредственное влияние скорости деформации на напряжение.

В настоящей статье мы и хотим показать, что в процессе резания скорость деформации непосредственно влияет на напряжение, причем это влияние принципиально такое же, как и в других видах пластической деформации.

Влияние скорости деформации на механические свойства металлов

Вопрос о влиянии скорости деформации на механические свойства металлов с достаточной полнотой изложен В. Д. Кузнецовым во II и V томах монографии „Физика твердого тела“. Приведем основные положения по этому вопросу.

Если деформация осуществляется при комнатной температуре, то все металлы по их отношению к влиянию скорости деформации можно грубо разделить на две группы, тугоплавкие и легкоплавкие. Влияние скорости деформации на механические свойства тугоплавких металлов значительно ниже, чем легкоплавких. Если же производить испытание тугоплавких металлов при высоких температурах, то чувствительность их к скорости деформации повышается, и они приближаются в этом отношении к легкоплавким металлам.

Наоборот, легкоплавкие металлы при пониженных температурах обнаруживают меньшую чувствительность, т. е. приближаются к тугоплавким металлам. Таким образом, деление металлов на две группы является чисто условным. Можно сказать, что чем выше температура плавления металла, тем меньше для него влияние скорости деформации на механические свойства при комнатной температуре.

Напряжение при пластической деформации является результатом двух одновременно действующих процессов,—процесса упрочнения, повышающего напряжение, и процесса отдыха, снимающего упрочнение и поэтому понижающего напряжение. Упрочнение является процессом атермическим, то есть независимым от температуры, при которой происходит деформация. Отдых, наоборот, является процессом термическим, зависящим от температуры. Отдых протекает тем более интенсивно, тем более значительно снимает упрочнение и снижает напряжение, чем выше температура, при которой происходит деформация, чем ближе она к температуре плавления данного металла. Процесс отдыха совершается во времени и тем более полно проходит, чем длительнее время отдыха, то есть чем ниже скорость деформации. С точки зрения влияния на напряжение при деформации одновременно действующих процессов упрочнения и отдыха все металлы—и легкоплавкие и тугоплавкие,—принципиально совершенно одинаково изменяют свои механические качества при изменении скорости деформации. При очень низких температурах, близких к абсолютному нулю, для всех металлов отдых не происходит, деформация сопровождается только упрочнением, и влияние скорости деформации на напряжение должно отсутствовать. При очень высоких температурах, близких к температуре плавления металла, отдых протекает настолько интенсивно, что снимает все упрочнение. В этом случае при ши-

роком диапазоне изменения скорости деформации напряжение может не зависеть от скорости деформации и лишь при очень высоких скоростях деформации, при которых отдых не будет успевать снимать все упрочнение, напряжение опять начнет возрастать с повышением скорости деформации. При комнатной температуре в процессе деформации тугоплавких металлов отдых будет играть мало заметную роль, так как интенсивность отдыха в тугоплавких металлах при комнатной температуре совершенно незначительна. Поэтому скорость деформации должна оказывать незначительное влияние на механические свойства и на напряжение.

При комнатной же температуре отдых в легкоплавких металлах протекает с большой интенсивностью, значительно снижая напряжение. Фактор времени при этом играет большую роль. Чем выше скорость деформации, тем отдых будет меньше снимать упрочнение, и повышение скорости деформации должно значительно повышать напряжение.

Все эти положения, разработанные школой Сибирского физико-технического института, предполагают сохранение постоянства температуры деформируемого объема металла при повышении скорости деформации. Если же при повышении скорости будет повышаться температура в результате выделившегося при деформации тепла, как это имеет место в процессе резания при высоких скоростях, то здесь влияние повышающейся скорости деформации на напряжение должно снижаться за счет влияния температуры на интенсивность отдыха.

Многочисленные опыты различных исследователей показывают, что под влиянием повышения скорости деформации повышаются механические характеристики металла: предел текучести, временное сопротивление, истинное напряжение. Однако наименее полно этот вопрос исследован в отношении к истинному сопротивлению, то есть именно к той характеристике, которая наиболее интересна. Влияние скорости деформации на механические характеристики металлов изучалось различными исследователями как при растяжении, так и при сжатии. Приведем результаты некоторых опытов.

В отношении влияния скорости растяжения на механические характеристики в различных опытах нет полной согласованности. Так, например, Шарпи [1] произвел опыты с разрывом стальных образцов при скорости до 30 м/сек, причем оказалось, что работа динамического разрыва при столь большой скорости превосходит работу статического разрыва лишь на 11%.

По данным Стентона и Берстау [2], при разрыве образцов из стали работа динамического разрыва превысила работу статического разрыва на 38%. Блаунт, Киркальди и Сенки [3] для котельного железа и стали получили превышение динамической работы над статической в среднем на 60%. По данным Кербера и Зака [4], отношение работ динамического и статического разрыва возрастает с повышением содержания углерода в стали от 1,22 при 0,08% углерода до 1,69 при 0,86% углерода. И. А. Одинг и С. П. Шихобалов [5] при растяжении хромоникелевомарганцовистой стали со скоростями от 0,06 мм/сек до 5,5 мм/сек не получили никакого изменения истинного сопротивления и удлинения, то есть и работы растяжения.

А. В. Бобылев и А. И. Чипиженко [6] при изменении скорости разрыва медных образцов в 300 раз получили совершенно незначительное повышение временного сопротивления.

Значительно сильнее скорость деформации влияет на механические характеристики легкоплавких металлов. Опыты В. Д. Кузнецова и Л. А. Швирк с оловом и свинцом, опыты М. А. Большаниной, Н. А. Большаниной и И. К. Горелова с оловом [6], опыты Закса с цинком [7] и другие показали, что временное сопротивление для этих металлов значительно повышается с повышением скорости деформации.

Вопрос о влиянии скорости деформации на механические характеристики металла при сжатии также был подвергнут исследованию многими авторами. Здесь выявилось принципиально то же положение, что и при растяжении. При сжатии тугоплавких металлов влияние скорости оказалось значительно менее существенным, чем при сжатии легкоплавких металлов. Если назвать отношение напряжения при динамическом сжатии к напряжению при статическом (при одинаковых степенях деформации) динамическим коэффициентом, то динамический коэффициент по ряду опытов возрастает с понижением температуры плавления металла. Так, по опытам Кунина и Низамовой [8] динамический коэффициент имел следующие значения (табл. 1).

Таблица 1

Металл	Температура плавления	Динамический коэффициент
Железо	1528	1.2
Медь	1083	1.23
Алюминий	658	1.35
Свинец	327	1.78
Олово	232	4.5

Подобные же величины были получены и в опытах Зеехазе [9].

Таблица 2

Металл	Динамический коэффициент
Железо заклепочное	1.11
Сталь	1.14
Медь	1.15

А. Д. Соколов называет отношение напряжений при разных скоростях сжатия скоростным коэффициентом [10]. Если обозначить скоростной коэффициент при изменении скоростей от 0,01 мм/сек до 1 мм/сек через z_1 , а для скоростей от 1 мм/сек до 2000 мм/сек через z_2 , то по Соколову значения этих коэффициентов для сжатия в условиях комнатной температуры будут следующими (табл. 3).

Таблица 3

Металл	Скоростной коэффициент	
	z_1	z_2
Сталь 3	1.16	1.35
Сталь 5	1.10	1.5
Сталь У—10	1.07	—
Медь	1.17	1.35
Алюминий	1.31	1.28
Цинк	2.12	—
Свинец	2.07	1.48
Олово	3.67	3.13

В этой таблице выражена та же тенденция, что и в табл. 1 по опытам Кунина и Низамовой, однако скоростной коэффициент здесь получил несколько иные значения.

Для стали ШХ-15 Л. Д. Соколов и С. З. Юдович [11] при изменении скорости сжатия от 0,01 мм/сек до 2000 мм/сек, т. е. в 200000 раз получили скоростной коэффициент лишь 1,16.

Опыты многих авторов, кроме этого, показали, что скоростной коэффициент с повышением температуры, при которой проводится испытание, значительно повышается.

На этом мы ограничимся перечислением выполненных исследований и обратимся к вопросу влияния скорости деформации на напряжение в процессе резания.

Скорость деформации при резании

Прежде чем перейти к непосредственному изучению влияния скорости деформации на процесс резания, укажем, что скорость резания не является скоростью деформации, но сравнение скоростей деформаций при резании можно производить через сравнение скоростей резания. Это станет ясным из следующих соображений. Прежде всего выясним, что следует понимать под скоростью деформации. В приложении к деформациям растяжения, сжатия, сдвига и т. д. этот вопрос наиболее полно освещен В. Д. Кузнецовым [12] и М. А. Большаниной [13]. В настоящее время под скоростью деформации разные авторы и исследователи подразумевают различные понятия: 1) скорость возрастания нагрузки в кг/сек; 2) скорость роста напряжения в кг/мм²сек, 3) скорость увеличения деформации в мм/сек; 4) скорость увеличения истинной относительной деформации $\frac{\Delta l}{l \Delta t} \frac{\%}{сек}$; 5) величину, обратную промежутку времени, в течение которого образец разрывается.

В. Д. Кузнецов и М. А. Большанина показывают, что наиболее правильно скорость деформации выражать скоростью увеличения истинной относительной деформации. Кроме этого, В. Д. Кузнецов указывает, что во всех случаях мерой скорости деформации может являться градиент скорости.

„По существу говоря, всякая пластическая деформация состоит в том, что одна какая-либо часть или один какой-либо слой деформируемого тела перемещается с определенной скоростью относительно другой части или другого слоя. Если расстояние между слоями равно dx , а разность скоростей равна dv , то градиент скорости $\frac{dv}{dx}$ является во всех случаях мерой скорости деформации“ [12].

Скорость деформации может быть также выражена скоростью изменения угла сдвига $\frac{d\gamma}{dt}$, причем можно доказать, что градиент скорости равен в процессе сдвига скорости изменения угла сдвига.

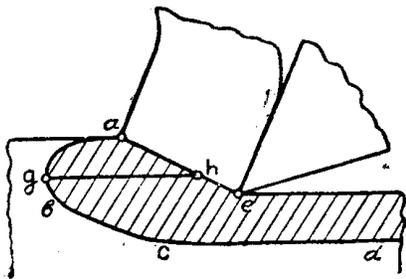
В приложении к таким процессам деформации, как равномерное растяжение, сжатие, кручение, определение скорости деформации не представляет затруднений, так как здесь обычно известны отрезки времени, в течение которых достигаются определенные абсолютные или относительные деформации.

В процессе резания определение скорости деформации встречает ряд затруднений.

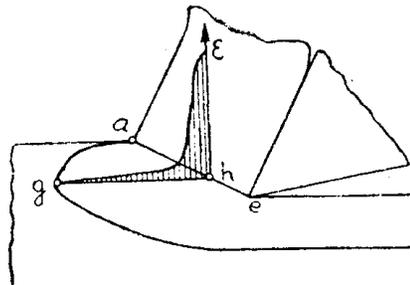
Мы представляем себе, что перед резцом, снимающим стружку, имеется некоторый пластически деформированный объем металла. На фиг. 1 этот объем в продольном разрезе представлен заштрихованной площадью.

В этом деформированном объеме на внешнем контуре его $abcd$ степень пластической деформации равна нулю, а на границе со стружкой ae , которую мы называем плоскостью сдвига, степень пластической деформации достигает наибольшего значения, равного степени деформации снятой стружки.

Если представить себе, что некоторый микрообъем металла в точке g вступает в зону пластической деформации и с некоторой скоростью, равной скорости резания, проходит отрезок gh , то за это время он проходит через все степени пластической деформации от нуля до степени деформации стружки. Если бы на отрезке gh степень деформации возрастала равномерно, то, зная отрезок gh и скорость резания, не представляло бы затруднения определить скорость деформации. Но наблюдения и опыт показывают, что вдоль gh степень деформации возрастает неравномерно. Весь деформированный объем имеет настолько незначительную степень деформации, что обычно не представляется возможным заметить искажение первоначальной



Фиг. 1



Фиг. 2

структуры металла. Только в непосредственной близости к линии ae первоначальная структура металла резко переходит в текстуру деформированной стружки. Таким образом почти вся деформация металла при резании протекает в узкой зоне около линии ae . Измерение микротвердости также показывает, что упрочнение металла, характеризующее степень деформации, имеет место в непосредственной близости к линии ae и при незначительном отступлении от этой линии твердость быстро снижается до твердости недеформированного металла.

Все это указывает на то, что в процессе резания пластически деформированная зона, находящаяся впереди резца и стружки, характеризуется переменной степенью деформации, причем степень деформации в этой зоне нарастает при приближении к плоскости сдвига ae неравномерно и не постепенно.

Предположительно можно представить эпюру распределения степени деформации вдоль линии gh так, как это изображено на фиг. 2.

Здесь по вертикалям от линии gh отложены степени деформации. Микрообъем металла, перемещаясь от точки g к точке h с некоторой скоростью в каждый данный момент, имеет свою степень деформации и свою скорость деформации. Первоначально в точке g скорость деформации равна нулю, затем она нарастает сперва очень незначительно, а при непосредственном приближении к точке h чрезвычайно сильно. Чтобы иметь возможность рассчитать скорость деформации в каждой точке деформированного объема, нужно было бы знать закон распределения степени деформации, чего мы не знаем, а поэтому и не можем определить скорости деформации в процессе резания.

Скорость деформации, несомненно, связана со скоростью резания, так как скорость резания определяет величину тех отрезков времени, в течение которых объемы металла проходят через все степени деформации. Поэтому

с повышением скорости резания и скорость деформации будет увеличиваться. Если бы с изменением скорости резания эпюра деформации оставалась неизменной, то можно было бы считать, что скорость деформации точно пропорциональна скорости резания. Но так как с изменением скорости резания возможно некоторое изменение и эпюры деформации, то можно говорить лишь о приблизительной пропорциональности между скоростью резания и скоростью деформации.

К этому следует добавить, что скорость деформации при постоянной скорости резания будет зависеть от степени деформации, так что стружки, снятые с одинаковыми скоростями резания, но имеющие различные степени деформации, будут получены, несмотря на постоянство скорости резания, при различных скоростях деформации. В том случае, где будет выше степень деформации, будет выше и скорость деформации, так как в те же отрезки времени будет достигнута более высокая степень деформации.

Строго говоря, на скорость деформации при резании оказывает влияние и толщина срезаемого слоя. Опытами А. М. Розенберга показано, что с увеличением толщины среза увеличивается впереди лежащий пластически деформированный объем металла [14]. Таким образом, при постоянной скорости резания и степени деформации стружки с увеличением толщины среза будут возрастать отрезки gh (фиг. 1), т. е. будут возрастать отрезки времени, в течение которых достигается конечная степень деформации, т. е. скорость деформации будет уменьшаться.

Таким образом, в процессе резания скорость деформации зависит от скорости резания, от характера эпюры деформаций, степени деформации и от толщины срезаемого слоя. Первостепенным и основным является влияние скорости резания, так как она может меняться в очень широких пределах, влияние же толщины среза и степени деформации на скорость деформации значительно менее существенно.

Выше мы показали, что даже для легкоплавких металлов влияние скорости деформации на механические свойства таково, что изменение скорости деформации в сотни и тысячи раз вызывает изменение механических свойств лишь на десятки процентов. С этой точки зрения влиянием изменения степени деформации и толщины среза через изменение скорости деформации на напряжение в процессе резания можно в большинстве случаев пренебречь. Поэтому в дальнейшем изложении мы будем считать, что в процессе резания скорость деформации изменяется лишь с изменением скорости резания, причем примерно пропорционально этой последней.

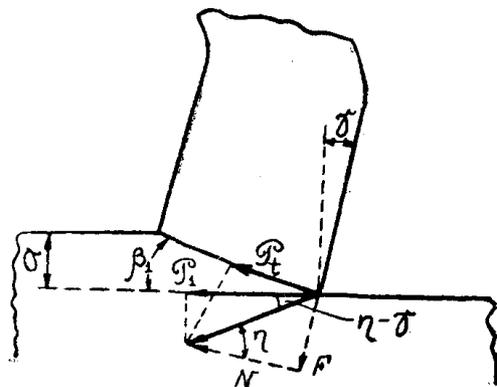
Влияние скорости деформации на напряжение в процессе резания

Для выявления влияния скорости деформации на напряжение в процессе резания нами были выбраны три различных металла, имеющих различную температуру плавления: сталь 40, алюминий и свинец. Можно было ожидать, что для этих трех металлов влияние скорости деформации будет резко различаться.

Необходимо было все опыты провести при строго постоянной температуре, так как в различных температурных пределах скорость деформации по различному влияет на механические характеристики одного и того же металла, о чем выше было сказано. В процессе резания этому условию могли удовлетворить только опыты, проведенные в интервале очень низких скоростей (микроскоростей), где можно было значительно увеличивать скорость резания без сколько-нибудь заметного повышения температуры в зоне деформации стружки. При скоростях резания, обычно применяемых на производстве, даже сравнительно небольшое повышение скорости вызывает существенное повышение температуры за счет тепла, выделяющегося в ре-

зультате деформации, что привело бы неизбежно к искажению влияния скорости на напряжение. По этим соображениям все опыты нами были проведены со скоростями резания, изменяющимися в пределах от 0,0003 м/мин до 0,76 м/мин, что позволяло без заметного повышения температуры в зоне деформации изменять скорость в достаточно широких пределах. Столь низкие скорости резания были удобны еще по двум соображениям. Во-первых, при этих скоростях не образуется нарост на передней грани резца, который сам по себе изменил бы протекание деформации в процессе резания, изменял бы геометрию инструмента, степень деформации стружки. Во-вторых, столь низкие скорости позволяли нам более достоверно сравнить количественно влияние скорости деформации в процессе резания с влиянием ее в других процессах деформации.

Влияние скорости на механические характеристики металла в процессе резания можно выявлять или по изменению силы резания с изменением скорости резания, или по изменению касательного напряжения в зоне сдвига стружки. По изменению силы резания при изменении скорости можно судить о чистом влиянии скорости деформации только в том случае, если при различных скоростях будут получены одинаковые коэффициенты трения стружки по передней грани резца и одинаковые усадки стружки, так как коэффициент трения и усадка стружки как самостоятельные факторы оказывают влияние на силу резания.



Фиг. 3

Это следует непосредственно из уравнения, связывающего касательное напряжение τ в плоскости сдвига с силой резания P_1 (фиг. 3).

$$P_1 = \frac{\tau ab}{\sin \beta_1} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\cos(\eta - \gamma + \beta_1)}$$

Здесь τ — касательное напряжение в плоскости сдвига,

a, b — толщина и ширина среза,

η — угол трения, $\operatorname{tg} \eta = \mu$, где μ коэффициент трения стружки по резцу,

β_1 — угол, определяющий положение плоскости сдвига, определяющий величину усадки стружки.

Из этого выражения следует, что судить об изменении τ по изменению P_1 можно лишь в том случае, если $a, b, \gamma, \eta, \beta_1$ сохраняют постоянные значения.

Для суждения о влиянии скорости деформации, на основе сравнения напряжений в зоне сдвига, необходимо это сравнение проводить при одинаковых степенях деформации стружки, так как степень деформации имеет самостоятельное влияние на напряжение.

Опыты проводились нами процессом свободного резания, чтобы наиболее упростить процесс и сделать наиболее достоверным определение коэффициента трения и степени деформации стружки. Во всех случаях проводилось сравнение сил резания в их части, приложенной на передней грани резца, силы на задней грани, как не принимающие участия в процессе деформации стружки, вычитались из сил, замеренных динамометром.

Для определения сил, приложенных на задней грани, применялась методика, разработанная нами и проверенная большим числом опытов [15]. Силы резания (две составляющие) в опытах измерялись очень чувствительным и точным упругим динамометром.

Влияние скорости на механические характеристики при резании стали

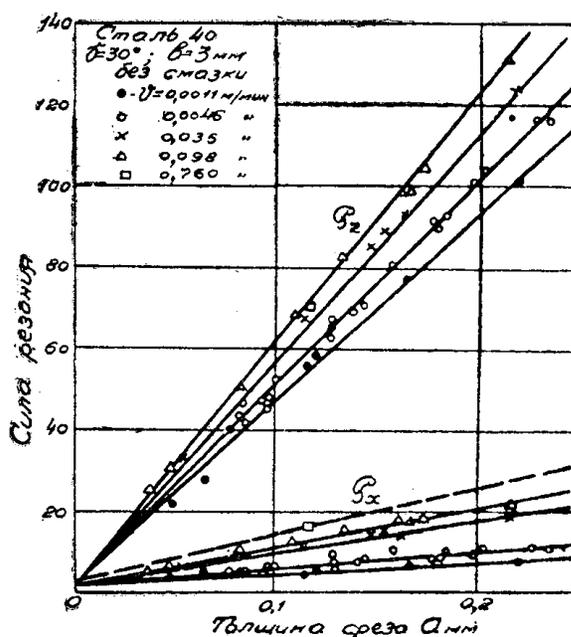
Для опытов была взята сталь 40, которая обладала хорошей однородностью и показала при механических испытаниях на растяжение, сжатие и кручение хорошее постоянство физико-механических характеристик.

Сталь имела следующие механические характеристики:

условный предел текучести при сжатии $\sigma_0 = 75,5 \text{ кг/мм}^2$,
 показатель политропы сжатия $m = 1,226$,
 временное сопротивление при растяжении $\sigma_b = 55,5 \text{ кг/мм}^2$,
 удлинение при разрыве $\delta = 24,6\%$,
 предел текучести $\sigma_s = 25 \text{ кг/мм}^2$,
 поперечное сжатие при разрыве $\psi = 52\%$,
 твердость по Бриннелю $H_B = 170$.

Резание производилось с шириной среза $b = 3 \text{ мм}$, с различными толщинами среза „а“, с различными передними углами от 40° до -1° , с применением различных смазок и без смазки. Скорости резания изменялись от $0,00088 \text{ м/мин}$ до $0,76 \text{ м/мин}$. Такого изменения скорости (в 864 раза) было достаточно для выявления влияния скорости деформации.

Результаты опытов без применения смазки с резцом, имеющим передний угол 30° , приведены на фиг. 4, где в координатах „толщина среза—силы резания“ проведены по экспериментальным точкам зависимости для двух составляющих силы резания при различных скоростях резания от $0,0011 \text{ м/мин}$

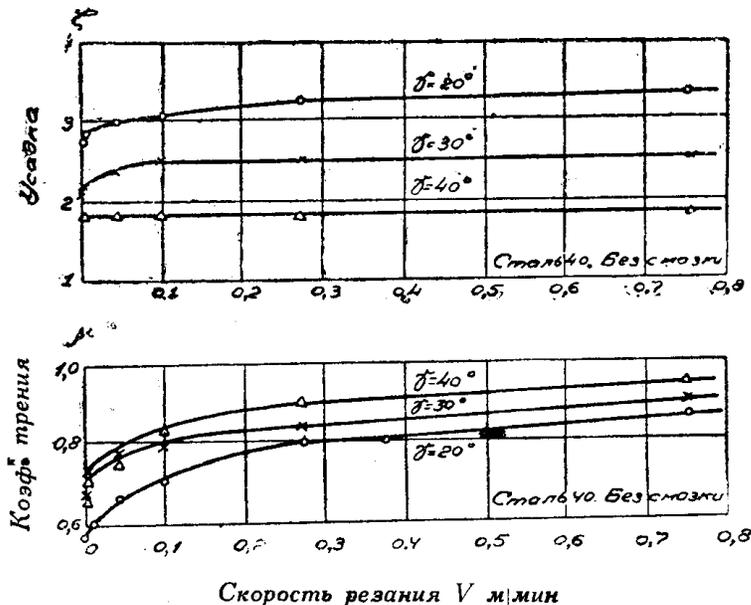


Фиг. 4

до $0,760 \text{ м/мин}$. Верхние линии относятся к главной составляющей силы резания P_z , расположенной по направлению скорости резания, нижние относятся к составляющей P_x , расположенной перпендикулярно к поверхности резания. Силы резания выражаются прямыми, что указывает на независимость коэффициента трения на передней грани от толщины среза при постоянной скорости резания. Прямые не проходят через начало координат, отсекая на оси ординат отрезки, равные силам на задней грани резца.

Такие же графики были получены нами и для резцов с другими передними углами.

При рассмотрении фиг. 4 создается впечатление, что силы резания значительно зависят от скорости резания, повышаясь с увеличением этой последней. Увеличение сил очень значительно. Так, при переходе от $v = 0,0011$ м/мин к $v = 0,760$ м/мин сила P_z увеличивается на 33%, а сила P_x на 56%. Но детальное исследование этого вопроса показывает, что при повышении скорости резания увеличивается усадка стружки и коэффициент трения стружки по передней грани резца. Зависимость усадки ζ и коэффициента трения μ от скорости резания, полученная нами в результате этих же опытов, представлена на фиг. 5, которая показывает, что повышение



Фиг. 5

скорости значительно повышает коэффициент трения и заметно повышает усадку стружки, в особенности в области самых малых скоростей резания.

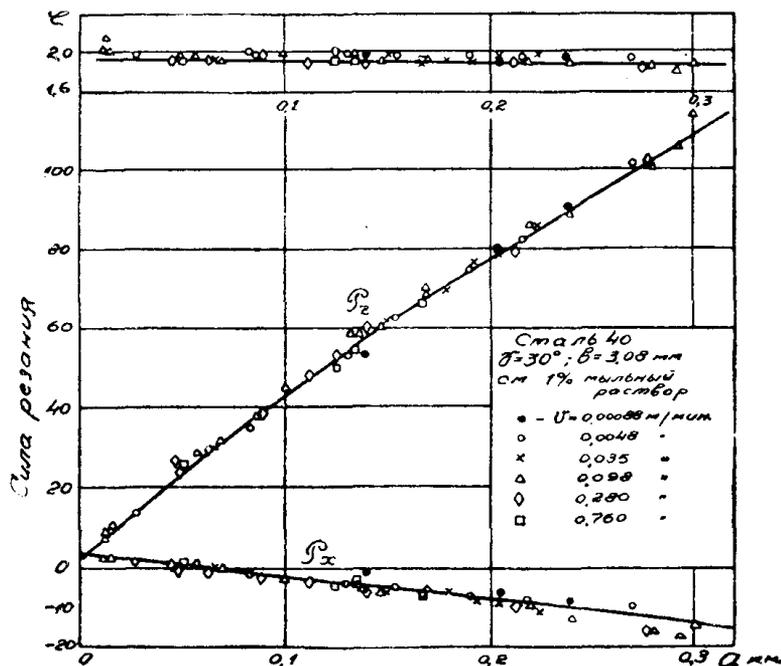
Поэтому фиг. 4 показывает влияние на силы резания не только самой скорости, как скорости деформации, но и влияние коэффициента трения и усадки стружки.

Иначе говоря, по фиг. 4 нельзя сделать правильных выводов о влиянии собственно скорости деформации на силы резания, а значит и на напряжения в зоне деформации стружки.

Для того чтобы выделить влияние собственно скорости, нужно было провести опыты таким образом, чтобы при разных скоростях были получены неизменные величины коэффициентов трения и усадки стружки. Считая, что при условии сохранения постоянной температуры на передней грани, коэффициент трения возрастает с повышением скорости резания ввиду снижения адсорбционного и окисляющего воздействия окружающей среды на поверхности трения, мы пришли к выводу, что подбором соответствующей смазки можно добиться постоянства режима трения и коэффициента трения. Нами были испробованы различные смазки (растительное масло, минеральное масло, солидол, 1% раствора мыла в воде). Наилучшие результаты получились при применении 1% раствора мыла в воде. Результаты опытов с этой смазкой приведены на фиг. 6 для переднего угла резца 30° и на фиг. 7 для переднего угла 20°. На этих фигурах, кроме сил резания, в верхней части показано изменение усадки стружки.

Фиг. 6 и 7 совершенно отчетливо показывают, что при применении

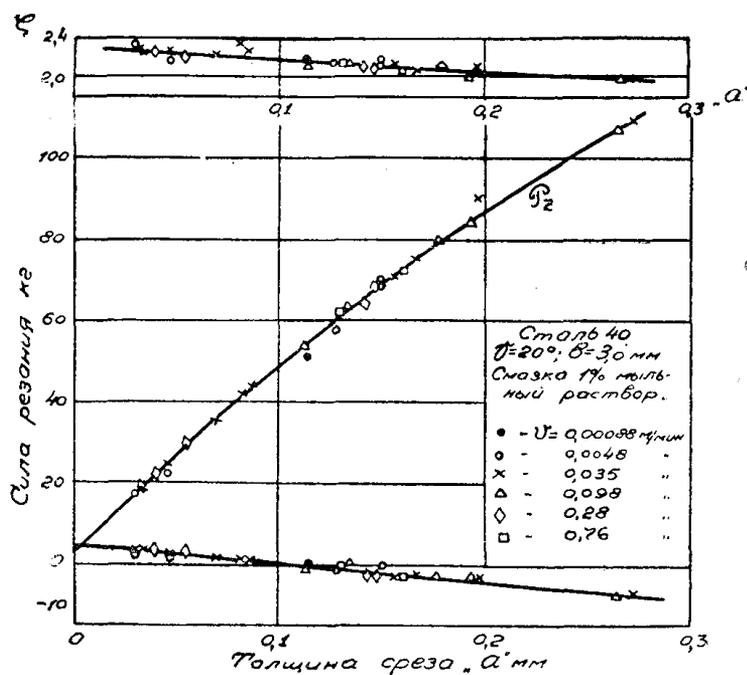
смазки 1% раствором мыла в воде влияние скорости резания на усадку и силы резания стало совершенно незаметным. Коэффициент трения при этом также не зависит от скорости резания, так как он при постоянном переднем угле реза определяется отношением $\frac{P_x}{P_z}$, которое при не зави-



Фиг. 6

сящих от скорости значениях P_x и P_z для каждого данного значения толщины среза „a“ остается постоянным.

Здесь следует указать, что смазка может оказывать поверхностно-активное влияние на обрабатываемый металл, но если бы такое в наших опы-



Фиг. 7

тах имело место, то с повышением скорости резания это влияние должно было бы снижаться, что должно было бы привести к повышению сил резания, чего мы не наблюдаем.

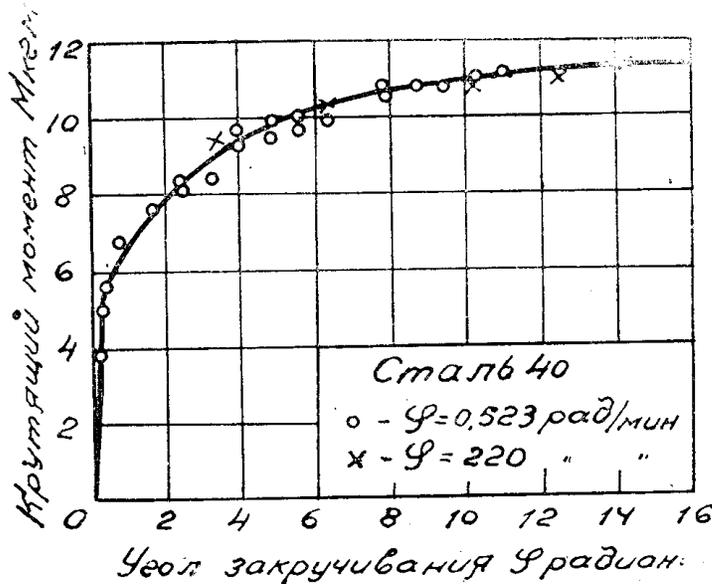
Так как изменение скорости резания в этом случае не повлекло за собой изменения ни сил резания, ни коэффициента трения и усадки стружки, то естественно и напряжение сдвига в зоне деформации стружки оказывается не зависящим от скорости.

Таким образом, опыты, проведенные по стали 40, показали, что скорость резания может влиять на силу резания через изменение коэффициента трения и усадки стружки, но скорость резания, как выражающая величину скорости деформации, не оказывает самостоятельного заметного влияния на силу резания и касательное напряжение при резании.

Представляло значительный интерес определить для сравнения влияние скорости деформации по этой же стали при других видах деформации. Мы это проделали путем опытов по кручению. Для кручения были изготовлены образцы из той же стали 40 со следующими размерами:

диаметр 10 мм
 расстояние между головками (длина цилиндрической части между галтелями) 60 мм.

Кручение производилось на специальной установке, которая позволяла в процессе опыта замерять и автоматически фиксировать на движущейся ленте бумаги величину крутящего момента и изменение его по углу поворота вращающегося захвата. Это измерение и запись осуществлялись гидравлической мессдозой с самопишущим манометром. Образец очень точно центрировался в захватах и при кручении доводился до разрушения. Скорость кручения можно было изменять в широких пределах. Мы в наших опытах



Фиг. 8

взяли две скорости кручения—0,523 радиана в минуту и 220 радиан в минуту. Таким образом, скорость деформации была изменена в 420 раз. На фиг. 8 представлена зависимость крутящего момента M на образце от угла закручивания φ , выраженного в радианах.

Фиг. 8 показывает, что при кручении стали 40 заметного влияния скорости деформации на момент кручения, а значит и на напряжение при кручении не обнаруживается. Таким образом, проявление влияния скорости

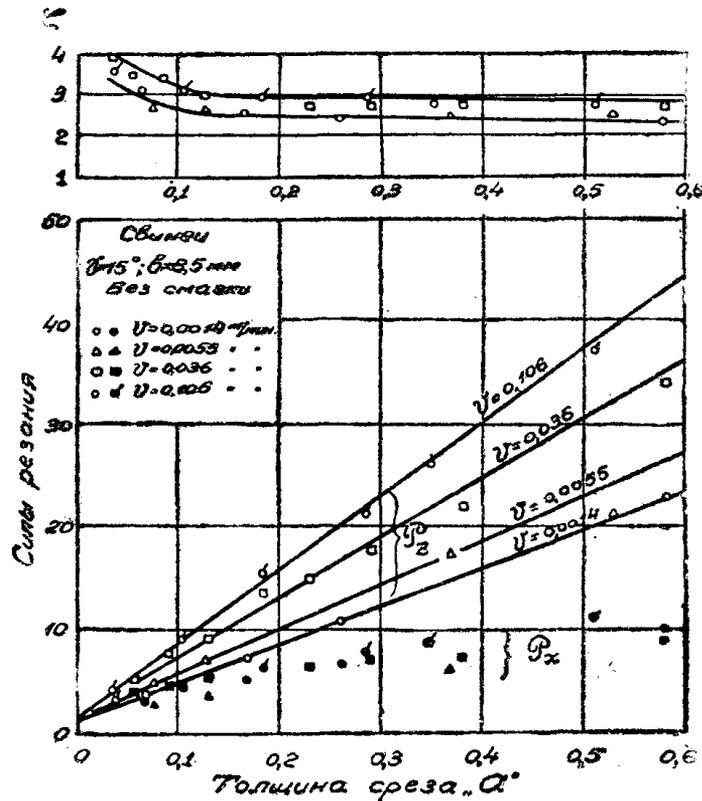
деформации в опытах по кручению стали 40 оказалось столь же незаметным, как и в опытах по резанию этой стали.

Влияние скорости на механические характеристики при резании свинца

Свинец был нами выбран для опытов как металл с низкой температурой плавления, для которого влияние скорости деформации должно было проявиться в значительной степени. Опыты по резанию свинца проводились в пределах скоростей резания от 0,00025 до 0,106 м/мин с измерением двух составляющих сил резания упругим динамометром. Для дальнейшего изложения мы воспользовались не только нашими опытами, но и опытами по свинцу А. М. Розенберга и Ю. П. Зимина. Все опыты были проведены методом свободного резания. Передние углы на резцах были: 10°, 15°, 30°, 45°, 60°. Резание осуществлялось как без смазки, так и с применением различных смазок.

Результаты измерения сил при резании резцом с $\gamma = 15^\circ$ представлены на фиг. 9.

В верхней части фигуры показано изменение усадки стружки с изменением толщины среза и скорости резания. Фиг. 9 показывает, что с повы-

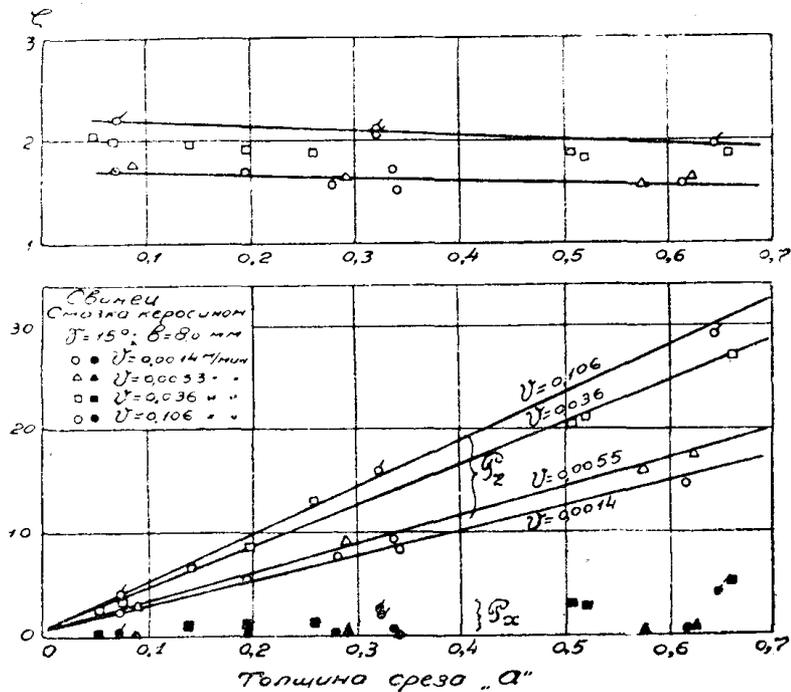


Фиг. 9

шением скорости резания силы P_z и P_x увеличиваются. Особенно значительно возрастает P_z . При увеличении скорости от 0,0014 до 0,106 м/мин, т. е. только в 76 раз, составляющая P_z увеличивается почти в 2 раза.

С повышением скорости, параллельно с P_z растет также P_x , но менее значительно, чем P_z , что указывает на изменение коэффициента трения, а также повышается и усадка стружки. Подобные же результаты были получены и при других передних углах резца.

Мы попытались применением различных смазок уничтожить влияние скорости на коэффициент трения и усадку стружки, как это удалось сделать при резании стали. Но эта попытка не увенчалась успехом. Наиболее эффективной смазкой для свинца оказался керосин. Он значительно снизил трение, усадку стружки, абсолютные значения сил резания, но не ликвидировал влияния скорости на коэффициент трения и усадку. Результаты опытов со смазкой керосином представлены на фиг. 10, который показывает, что абсолютные значения сил резания и усадки стали значительно меньше, но влияние скорости резания осталось не в меньшей степени.



Фиг. 10

Поэтому для решения вопроса о влиянии скорости деформации на механические характеристики при резании свинца пришлось перейти к расчету напряжений сдвига τ в плоскости сдвига. Угол β_1 , определяющий положение плоскости сдвига, вычислялся через усадку стружки ζ

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma}.$$

Напряжение сдвига τ рассчитывалось по зависимости

$$\tau = \frac{P_1 \sin \beta_1 \cos (\beta_1 + \eta - \gamma)}{ab \cos (\eta - \gamma)}.$$

Сила P_1 определялась путем вычитания из замеренной динамометром силы P_z величины силы, приложенной на задней грани резца в направлении скорости резания.

Угол трения η определялся по зависимости

$$\operatorname{tg} \eta = \operatorname{tg} (\omega + \gamma); \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{P_2}{P_1},$$

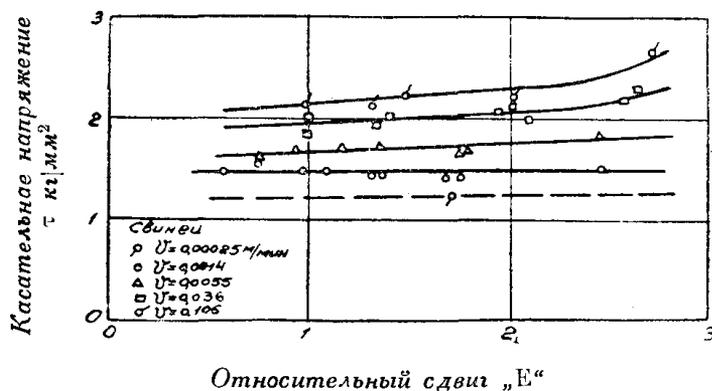
где P_2 и P_1 составляющие сил, приложенные на передней грани резца. P_2 определялась вычитанием из P_x силы, приложенной на задней грани в направлении нормали к поверхности резания.

Напряжение сдвига τ связывалось с относительным сдвигом ϵ , который определялся по уравнению

$$\epsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma).$$

По результатам вычислений нами построен график зависимости напряжения сдвига τ от величины относительного сдвига ϵ , представленный на фиг. 11.

Из фиг. 11 следует, что при резании свинца скорость очень сильно влияет на напряжение сдвига τ . Обращает на себя внимание, что при малой скорости (0,0014 м/мин) напряжение не зависит от степени деформации и при значительно меняющихся значениях относительного сдвига остается постоянным. При более высоких скоростях напряжение растет с увеличением степени деформации, причем тем более значительно, чем выше скорость.



Фиг. 11

По нашему мнению, это объясняется следующим образом. При постоянной скорости резания повышение степени деформации само по себе, по видимому, приводит к повышению скорости деформации, так как каждая частица металла, проходя через зону деформации, за тот же отрезок времени достигает более высокой степени деформации, так что скорость деформации в процентах в единицу времени возрастает с увеличением степени деформации. Это должно приводить при постоянстве скорости резания к росту напряжения при увеличении степени деформации (относительного сдвига). При очень малых скоростях резания это менее заметно ввиду того, что отдых может протекать более полно; при повышении скорости резания отдых менее значительно снижает прирост напряжения, и он заметнее растет с повышением степени деформации.

Мы произвели сравнение изменения напряжения в процессе резания под влиянием скорости с таковым же при процессе сжатия. Сжатие осуществлялось нами с различными скоростями и определялась связь напряжения в образце со степенью деформации. В каждом опыте мы осуществляли сжатие с постоянной скоростью деформации, для чего в течение каждого опыта скорость перемещения сжимающих образец плоскостей снижалась обратно пропорционально степени деформации образца. Непрерывно и постепенно снижать в течение одного опыта скорость перемещения сжимающих образец плоскостей мы не имели возможности. Поэтому мы скорость изменяли ступенями через каждые 20—25% степени деформации образца. Таким образом, на каждом опыте скорость деформации не сохранялась строго постоянной. Она колебалась относительно некоторого среднего для данного опыта значения в пределах $\pm 10\%$ — $\pm 12,5\%$. Такое колебание скорости деформации не могло оказать сколько-нибудь существенного влияния на результаты, что будет ясно из последующего изложения.

Образцы для сжатия имели размеры:

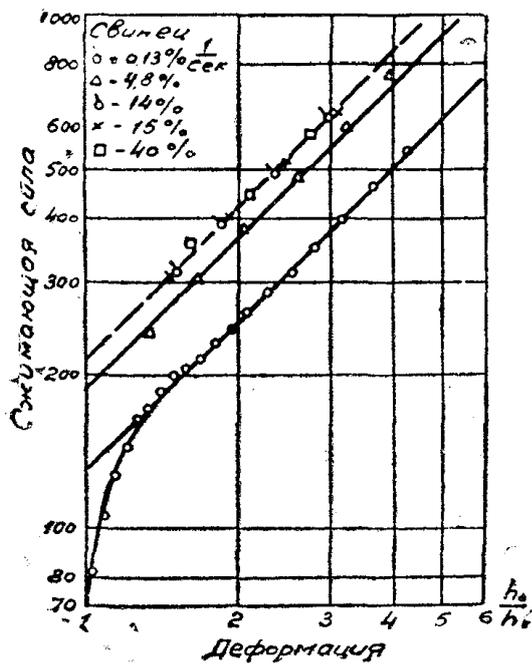
диаметр $d_0 = 10$ мм,

высота $h_0 = 25$ мм.

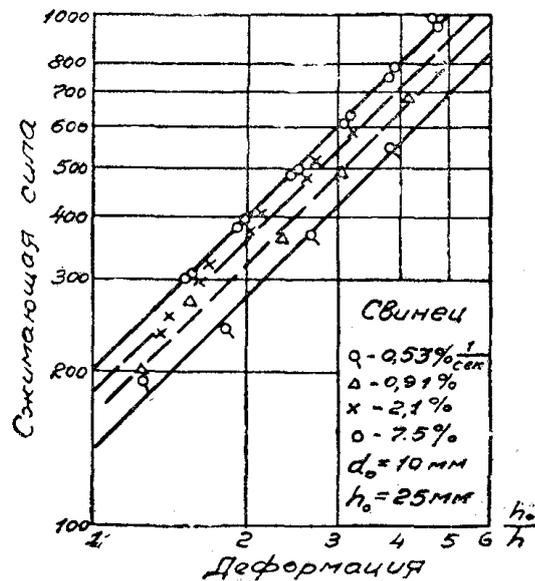
Сжатие проводилось как без смазки, так и со смазкой керосином.

На фиг. 12, 13, 14 в логарифмических графиках приведены результаты опытов по сжатию. По оси абсцисс отложена относительная деформация $\frac{h_0}{h}$, где h_0 —первоначальная высота образца, h —высота в данный момент, по оси ординат—сжимающая сила.

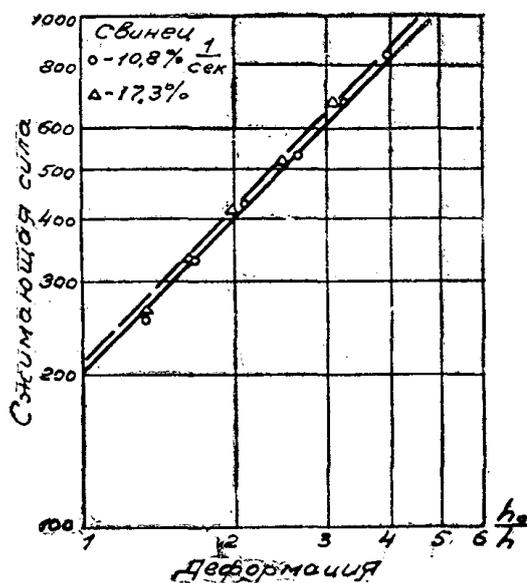
Скорость деформации в опытах мы рассчитали в процентах относительной деформации в секунду.



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14

В опытах эта скорость изменялась от $0,13\% \frac{1}{\text{сек}}$ до $40\% \frac{1}{\text{сек}}$, т. е. в 307 раз.

Приведенные графики дают возможность сделать следующие заключения. С повышением скорости деформации сжимающая сила, а значит, и напряжения значительно возрастают.

Так, при увеличении скорости деформации в 307 раз сжимающая сила и напряжение возросли на 70% .

Точки каждого опыта расположились с достаточной степенью точности на прямой, что говорит о соблюдении политропического закона. Лишь при самых больших степенях деформации—при $\frac{h_0}{h} > 4$ точки некоторых опытов отклоняются от прямых вверх, что, повидимому, является результатом влияния трения на торцах образцов на напряженное состояние.

Все прямые расположены под углом 45° к оси абсцисс. Это указывает на то обстоятельство, что свинец при комнатной температуре в условиях постоянства скорости деформации не упрочняется (показатель политропы $m = 1$, $n = m - 1 = 0$), напряжение в течение всего сжатия остается постоянным.

Дополитропическая часть кривой сжатия на этих фигурах приведена лишь для самой малой скорости деформации, так как она нам для исследуемого вопроса была не нужна.

Для сравнения влияния скорости деформации на напряжения при резании и сжатии свинца нами построен график, представленный на фиг. 15, где по оси абсцисс отложена скорость деформации, по оси ординат—напряжение. Скорость деформации для сжатия отложена в $\% \text{сек}^{-1}$. Для резания абсолютных значений скорости деформации мы не знаем, поэтому для резания здесь отложены скорости резания в мм/мин , так как



Фиг. 15

можно считать, что скорость деформации пропорциональна скорости резания при одной и той же степени деформации. На оси ординат для процесса резания отложены касательное напряжение „ τ “ в плоскости сдвига при постоянном значении относительного сдвига $\epsilon = 1,4$. Кружками показаны результаты опытов по сжатию, крестиками—по резанию, сплошная линия проведена как средняя для опытов по резанию, прерывистая—для опытов по сжатию. То обстоятельство, что линии (сплошная и прерывистая) не совпали друг с другом, не имеет никакого значения, так как оно является результатом того, что нам неизвестны абсолютные значения скоростей деформации при резании и нами чисто условно на оси абсцисс приравнены $1\% \text{сек}^{-1}$ при сжатии и 1мм/мин при резании. Важно отметить, что обе линии в логарифмическом графике получены прямыми и имеющими один и тот же наклон, что указывает на совершенно одинаковое влияние скорости деформации на напряжение как при резании, так и при сжатии. Если

выразить аналитически влияние скорости деформации на напряжение, то получим

$$\tau = \tau_0 \cdot V^{0,102}.$$

Следует заметить, что хотя на фиг. 15 нами совершенно условно на оси абсцисс приравнены скорость деформации при сжатии в 10^0 1/сек и скорость резания в 1 мм/мин, все же, повидимому, скорости деформации при резании и при сжатии для этих значений были очень близки друг к другу. Это можно заключить потому, что при скорости деформации при сжатии в 10^0 сек⁻¹ и при высоте образца, изменяющейся в процессе деформации от 25 до 6 мм, скорость перемещения сжимающих образец плоскостей изменялась в опыте от 15 мм/мин до 3,6 мм/мин. Таким образом, скорости перемещения деформирующих тел при резании и сжатии лишь незначительно разнятся.

Влияние скорости на механические характеристики при резании алюминия

Как следует из изложенного выше материала, влияние скорости деформации на напряжение при резании стали оказалось совершенно незаметным, при резании свинца, наоборот, оказалось очень существенным. Влияние скорости деформации при кручении стали и при сжатии свинца оказалось точно таким же, как и при резании. Различное влияние скорости деформации на напряжение для стали и свинца объясняется тем, что эти два металла имеют совершенно различную температуру плавления. Сталь имеет очень высокую температуру плавления и при деформировании в условиях комнатной температуры процесс отдыха проходит в столь незначительной степени, что не может повлиять на напряжение. Деформирование свинца в условиях комнатной температуры, наоборот, сопровождается интенсивным отдыхом и фактор скорости деформации оказывает значительное влияние на полноту протекания отдыха и на напряжение в процессе деформирования.

Алюминий имеет температуру плавления более высокую, чем свинец, но значительно более низкую, чем сталь. Поэтому можно было ожидать, что для алюминия влияние скорости на напряжение при резании должно быть менее существенным, чем для свинца, но уже более отчетливо проявляющимся, чем для стали. Именно это и было нами получено в результате проведенных опытов по резанию алюминия с различными микроскоростями. Скорости резания нами изменялись в пределах от 0,0048 м/мин до 0,76 м/мин.

Результаты опытов по резанию алюминия без применения смазки показаны на фиг. 16, на фиг. 17 представлены результаты опытов при применении смазки керосином.

Фиг. 16 показывает значительный разброс экспериментальных точек, что является результатом налипания алюминия на переднюю грань резца при резании без смазки. Несмотря на значительное рассеивание точек, все же совершенно явно проявляется значительное увеличение обеих составляющих силы резания с повышением скорости резания.

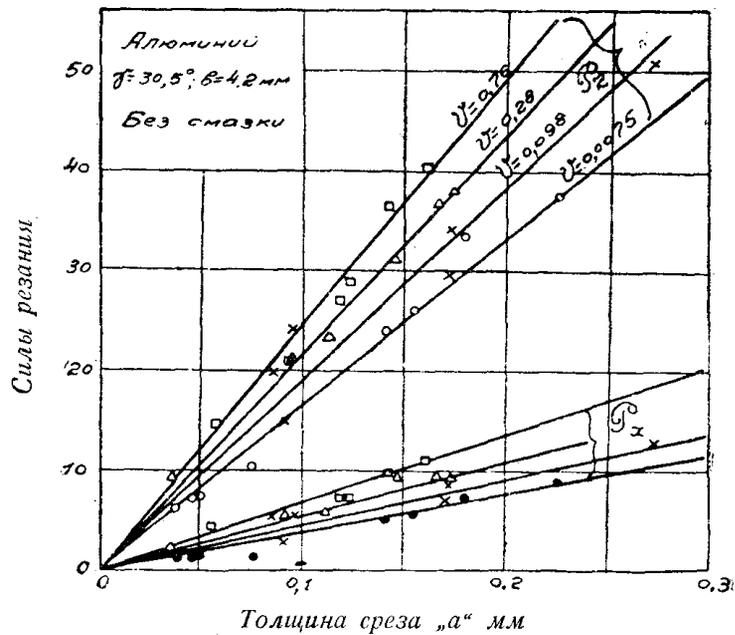
При смазке керосином получено хорошее расположение экспериментальных точек на фиг. 17. Влияние скорости на силы резания стало значительно меньшим, чем без смазки, но не ликвидировалось совсем.

На фиг. 18 по результатам этих же опытов показано изменение усадки стружки и коэффициента трения с изменением скорости резания.

Эта фигура показывает, что при резании без смазки повышение скорости сопровождается значительным возрастанием усадки стружки (значит, и степени ее деформации) и коэффициента трения.

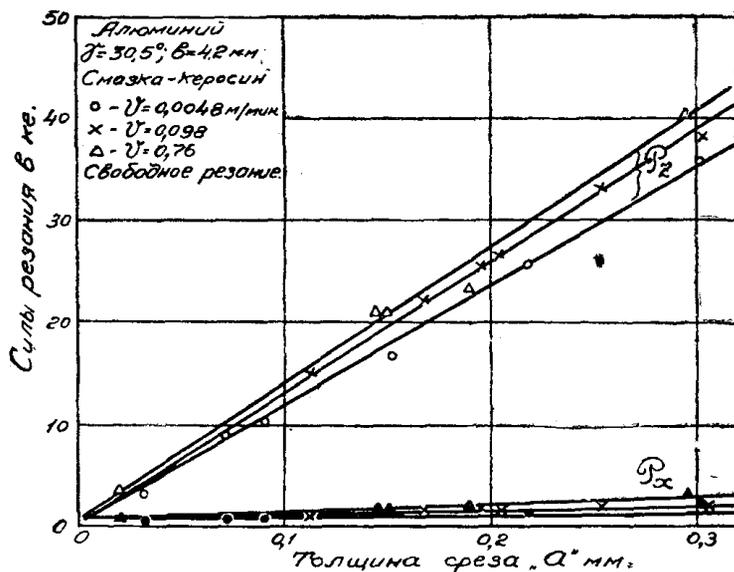
При резании со смазкой керосином усадка стружки остается неизменной, коэффициент трения совершенно незначительно повышается при значительном увеличении скорости.

Отсюда можно заключить, что возрастание сил при резании алюминия без смазки, представленное на фиг. 16, является не только результатом повышения напряжения под влиянием скорости, но также результатом повышения степени деформации и коэффициента трения.



Фиг. 16

Так как при резании алюминия со смазкой коэффициент трения и усадка стружки остаются неизменными, то влияние скорости на силы резания, представленное на фиг. 17, является влиянием собственно скорости дефор-



Фиг. 17

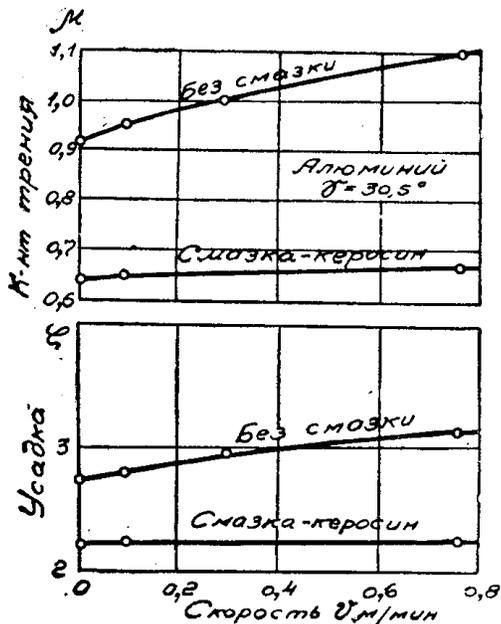
мации на напряжение. Поэтому нами были подсчитаны из опытов со смазкой напряжения сдвига τ и представлены в зависимости от скорости резания на логарифмическом графике фиг. 19.

Фиг. 19 показывает, что при изменении скорости резания в 158 раз напряжение возросло на 18,5%. Таким образом, если принять, что напря-

жение в логарифмическом графике изменяется по закону прямой, то можно выразить влияние скорости деформации на напряжение при резании алюминия зависимостью

$$\tau = \tau_0 \cdot V^{0,034}$$

Мы не проводили опытов по выявлению влияния скорости деформации на напряжение при других видах деформирования алюминия. В этом вряд ли есть необходимость, так как для двух характерных металлов (сталь



Фиг. 18

и свинец) нами было показано совершенно одинаковое влияние скорости деформации при резании и при других видах деформирования.

Влияние скорости на напряжение при резании алюминия оказалось не столь значительным, как при резании свинца. Этого, как выше было указано, и следовало ожидать.



Фиг. 19

Выводы

1. В процессе резания на напряжение оказывает влияние не только скорость деформации, но и степень деформации металла в зоне сдвига стружки.

2. Путем специально проведенных опытов при широком диапазоне изменения скорости резания при условии неизменности температуры удалось выделить влияние собственно скорости деформации на напряжение при резании.

3. Опытами показано, что степень влияния скорости деформации на напряжение при резании зависит от температуры плавления металла и оказывается точно такой же, как и при других видах деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Charpy. Rev. de metall. 1909, 1235.
2. T. Stanton and L. Bairstow. Proc. Inst. Mech. Eng. 1908. p. 889.
3. Blount, Kirkaldy and Sankey. Proc. Inst. Mech. Eng. 1910. 715.
4. F. Körber und R. Sack. Mitt. Kais. Wilh. Inst. f. Eisenf. 1922.
5. Вестник металлопромышленности, № 1, 1939.
6. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Том V.
7. Sachs. Z. f. Metallkunde. 1925.
8. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Том II, стр. 622.
9. H. Seehase. Forschungsarbeit VDI, 1915.
10. Л. Д. Соколов. Журнал технической физики, 1946, стр. 437—442. 1947, стр. 543—548.
11. С. З. Юдович и Л. Д. Соколов. Сталь, № 2, стр. 127—130, 1947.
12. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Том V, стр. 14—25.
13. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Том II, глава XXVIII, § 9.
14. А. М. Розенберг. Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки. Изв. Томск. технол. института, 1929.
15. А. М. Розенберг. Определение сил на задней грани резца. Сборник „Вопросы машиноведения и машиностроения“. Западно-Сибирский филиал АН СССР, 1951.