

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ РЕЗАНИИ ХРУПКОГО МЕТАЛЛА

А. М. РОЗЕНБЕРГ и Ю. А. РОЗЕНБЕРГ

Как показано в работе А. М. Розенберга и А. Н. Еремина, влияние скорости деформации на напряжение при резании пластичных металлов точно такое же, как и при других видах деформации [1], поэтому можно предвидеть, каково будет это влияние при резании хрупких металлов.

Влияние скорости на напряжение в процессе деформации зависит от явления упрочнения и отдыха. Упрочнение повышает напряжение, отдых, снимая в той или иной степени упрочнение, тем самым снижает напряжение.

Так как отдых протекает во времени и с различной интенсивностью при различных температурах, то и скорость деформации оказывает влияние на протекание отдыха, а через отдых и на напряжение, по-разному в различных температурных зонах. Все многообразие влияния скорости деформации на напряжение зависит только от влияния скорости на полноту протекания процесса отдыха.

При деформации хрупких металлов не приходится говорить об упрочнении постольку, поскольку упрочнение является результатом и следствием пластического изменения формы, которого у хрупких металлов в заметной степени не наблюдается. Коль скоро хрупкая деформация не сопровождается упрочнением и повышением напряжения, являющимся результатом упрочнения, то этим самым отрицается и возможность снижения напряжения в результате отдыха.

Так как скорость деформации влияет на напряжение лишь постольку, поскольку эта скорость влияет на полноту протекания процесса отдыха и снятия упрочнения, то естественно прийти к выводу, что для металлов хрупких не должно существовать заметного влияния скорости деформации на напряжение. Значит, следует ожидать, что при резании хрупких металлов скорость резания не должна сама по себе оказывать влияния на напряжение в зоне сдвига стружки, и это напряжение должно при всех разнообразных условиях резания оставаться неизменным, в том случае, если на него не оказывают влияния какие-либо дополнительные обстоятельства. Таким дополнительным обстоятельством может являться температура нагрева зоны деформации, изменяющаяся с изменением скорости резания. Если эта температура будет в процессе резания изменять исходные механические характеристики обрабатываемого металла, то это может изменить напряжение в зоне сдвига стружки. Однако это уже будет являться следствием не скорости деформации, а следствием температуры.

При резании пластичного металла влияние скорости деформации на напряжение можно было выявить опытами на очень малых скоростях резания (микроскоростях), при которых широкий диапазон изменения скорости резания (например, от 0,001 до 1 м/мин) не изменяет сколько-нибудь заметно температуру в зоне деформации. При решении этого вопроса в приложении к хрупким металлам воспользоваться микроскоростями не представляется возможным, так как стружка с хрупкого металла отделяется в этих условиях отдельными элементами, сила резания подвержена сильным коле-

баниям, что не позволяет получить достоверных ее значений, необходимых для расчета напряжений.

Поэтому в данном случае экспериментальное решение вопроса о влиянии скорости деформации на напряжение возможно лишь в зоне таких скоростей, при которых процесс идет более равномерно, стружка сходит с резца в виде отдельных локонов и сила резания может быть достоверно зафиксирована. При этих скоростях температура в зоне сдвига стружки значительно повышается с ростом скорости резания и может оказать воздействие на исходные свойства металла.

Температура в зоне сдвига стружки

Температура в зоне сдвига стружки является функцией количества тепла, выделившегося в этой зоне в результате произведенной работы сдвига, а также функцией интенсивности теплоотвода.

В некоторых случаях можно предполагать, что к зоне сдвига осуществляется приток тепла от передней грани резца, где температуры в большинстве случаев значительно выше, чем в зоне сдвига. Такой приток тепла от передней грани может осуществляться только через стружку. Вероятность притока тепла с передней грани через стружку тем меньше, чем больше скорость резания, так как с повышением скорости резания скорость перемещения стружки по передней грани резца увеличивается и с некоторого своего значения становится больше скорости распространения тепла. С этого момента возможность подогрева зоны сдвига теплом с передней грани резца прекращается, так как направления движения стружки по передней грани и теплового потока от передней грани к зоне сдвига противоположны.

В приложении к случаю резания хрупкого металла (серого чугуна), не дающего целой сливной стружки, возможность подогрева зоны сдвига теплом с передней грани вообще маловероятна.

В этом случае температура в зоне сдвига будет зависеть только от тепла, выделившегося в этой зоне, и от интенсивности его отвода в основном в обрабатываемый кусок металла.

Теплоотвод с повышением скорости резания будет снижаться, что будет вызывать относительное повышение температуры в зоне сдвига при повышении скорости резания, при всех прочих постоянных условиях.

Если при расчете температуры в зоне сдвига пренебречь теплоотводом от этой зоны, то при этом возможна ошибка лишь в сторону завышения температур против действительных.

Без учета возможности теплоотвода температуру в зоне сдвига рассчитать не представляет затруднения, так как она должна зависеть только от удельной работы, совершаемой в процессе резания в этой зоне. Удельная работа определяет количество выделившегося тепла в единице объема металла, а это последнее в совокупности с теплоемкостью обрабатываемого металла дает температуру. Таким образом для определения температуры в зоне сдвига нужно определить удельную работу сдвига.

Общая удельная работа, совершаемая передней гранью резца, определится по выражению

$$A_w = \frac{P_1 \cdot v}{abv} = \frac{P_1}{ab} \text{ кг мм/мм}^3, \quad (1)$$

где A_w — общая удельная работа, совершаемая передней гранью резца,
 a, b — размеры поперечного сечения среза — толщина и ширина среза.
 v — скорость резания,
 P_1 — сила, приложенная на передней грани в направлении скорости резания.

Общая удельная работа, совершаемая передней гранью, является суммой удельной работы трения на передней грани A_{w_F} и удельной работы в зоне сдвига стружки A_{w_t} .

$$A_w = A_{w_F} + A_{w_t}.$$

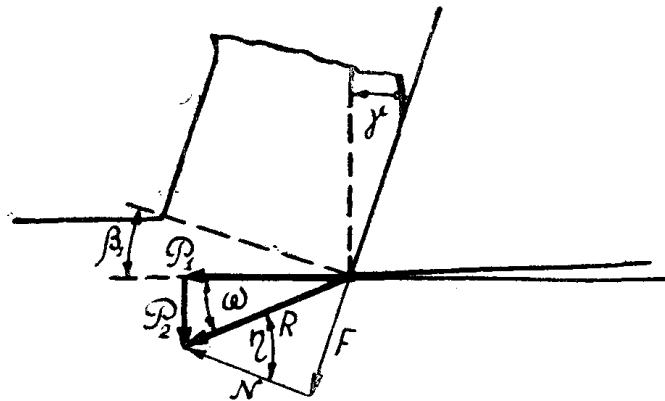
Отсюда удельная работа в зоне сдвига

$$A_{w_t} = A_w - A_{w_F}. \quad (2)$$

Удельная работа трения на передней грани,

$$A_{w_F} = \frac{F v_F}{a b v},$$

где F — сила трения на передней грани,
 v_F — скорость перемещения стружки по передней грани.



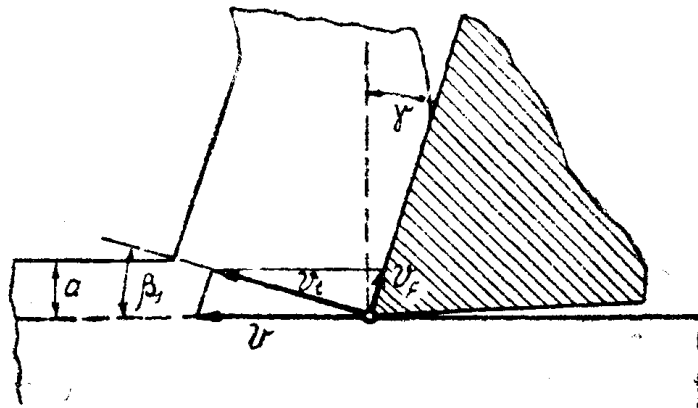
Фиг. 1

В свою очередь

$$F = P_1 \frac{\sin \eta}{\cos \omega},$$

$$v_F = v \frac{\sin \beta_1}{\cos (\beta_1 - \gamma)},$$

как это следует из фиг. 1 и 2.



Фиг. 2

Здесь η — угол трения между стружкой и передней гранью резца,
 β_1 — угол, определяющий направление плоскости максимальных касательных напряжений,

ω — угол между силами P_1 и R , причем $\operatorname{tg} \omega = \frac{P_2}{P_1}$.

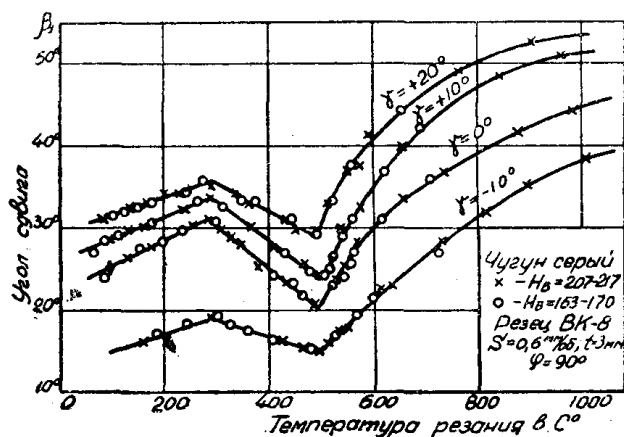
Отсюда для удельной работы трения получим

$$A_{wF} = \frac{P_1}{ab} \frac{\sin \eta \cdot \sin \beta_1}{\cos \omega \cdot \cos (\beta_1 - \gamma)}. \quad (3)$$

Подставляя (1) и (3) в (2), получим выражение для удельной работы сдвига

$$A_{w_t} = \frac{P_1}{ab} \left\{ 1 - \frac{\sin \eta \cdot \sin \beta_1}{\cos \omega \cdot \cos (\beta_1 - \gamma)} \right\}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что для определения удельной работы в зоне сдвига стружки необходимо знать величины P_1 , P_2 , η , β_1 , γ , a , b . Все эти величины определяются экспериментальным путем. Силы P_1 и P_2 , как силы, действующие на передней грани резца, определяются путем вычитания из сил, замеренных динамометром, сил, приложенных на задней грани резца. При этом в случае свободного резания сила P_2 расположена перпендикулярно поверхности резания, в случае несвободного резания она является равнодействующей сил, расположенных в плоскости, перпендикулярной поверхности резания, и получается как разность сил, измеренных динамометром, и сил, расположенных на задней грани в этой плоскости.



Фиг. 3

При известных P_1 и P_2 угол ω определяется из выражения

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

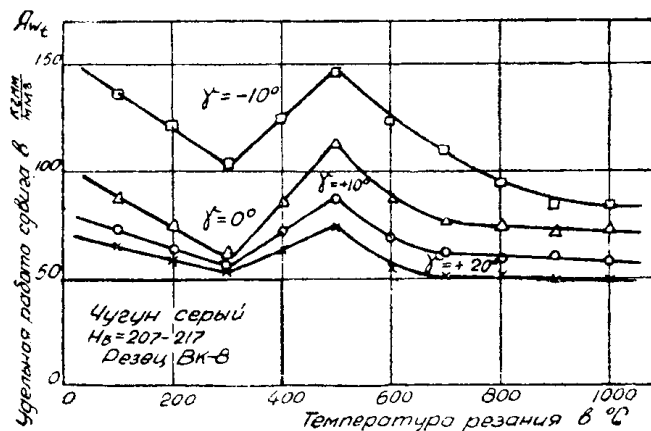
Угол трения η может быть определен при известном переднем угле γ из выражения

$$\eta = \omega + \gamma.$$

Угол β_1 , определяющий положение плоскости сдвига, при резании хрупкого металла находится путем непосредственного измерения в процессе резания через микроскоп с нитями и градусной шкалой в поле зрения.

На фиг. 3 приведены результаты измерений угла β_1 при резании чугунов различной твердости резцами, имеющими различный передний угол γ .

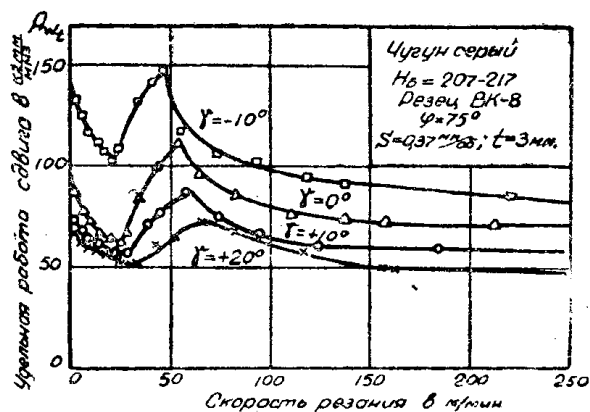
По оси абсцисс здесь отложена температура на передней грани резца, измеренная естественной термопарой. Можно было бы угол β_1 поставить не в зависимость от температуры на передней грани, а в зависимость от скорости резания, но при этом для каждой твердости чугуна получились бы свои отдельные кривые и график получился бы менее наглядным. Фиг. 3 показывает, что угол β_1 , изменяясь при изменении температуры на передней грани, а значит, и скорости резания, по кривым сложного характера, в то же время при одинаковых температурах на передней грани резца имеет одинаковое значение для различных чугунов. При одинаковых температурах он также не зависит от сечения среза.



Фиг. 4

На фиг. 4 представлен график изменения удельных работ сдвига для различных передних углов при резании твердого чугуна $H_B = 207-217$.

Здесь также по оси абсцисс отложены температуры на передней грани. Для того чтобы дать представление о влиянии скорости резания на удельную работу сдвига, на фиг. 5 даны те же результаты в координатах скорость—удельная работа.



Фиг. 5

Сравнение фиг. 3 и 4 показывает, что удельная работа связана с углом β_1 , что вполне естественно, так как этот последний определяет величину относительного сдвига.

Фиг. 4 дает значения удельной работы в зоне сдвига для чугуна с твердостью $H_B = 207-217$. Для чугунов других твердостей удельные работы будут изменяться пропорционально твердости, так как исследования пока-

зывают, что при условиях постоянной температуры на передней грани резца силы, приложенные на передней грани, прямо пропорциональны твердости чугуна, углы трения η и углы сдвига β_1 не зависят от твердости чугуна.

Имея величину удельной работы A_{wt} и характер ее изменения с изменением параметров процесса резания, не представляет затруднений определить температуру в зоне сдвига по выражению

$$t_{сдв}^0 = \frac{1000 \cdot A_{wt}}{427 \cdot \rho \cdot c} + t_0^0. \quad (5)$$

Здесь 427 — механический эквивалент тепла,

ρ — удельный вес обрабатываемого материала,

c — средняя удельная теплоемкость обрабатываемого материала,

t_0^0 — температура болванки.

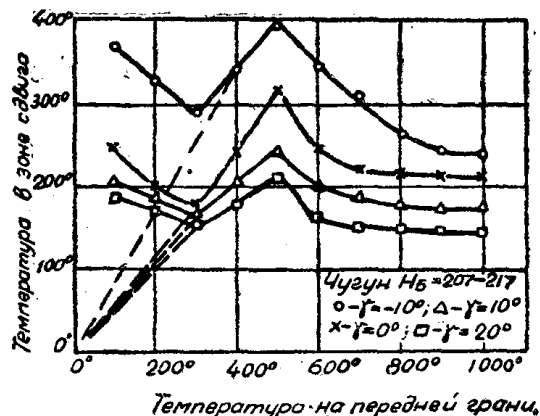
Для расчета можно принять следующие численные значения для серого чугуна

$$\rho = 7,0 \text{ г/см}^3,$$

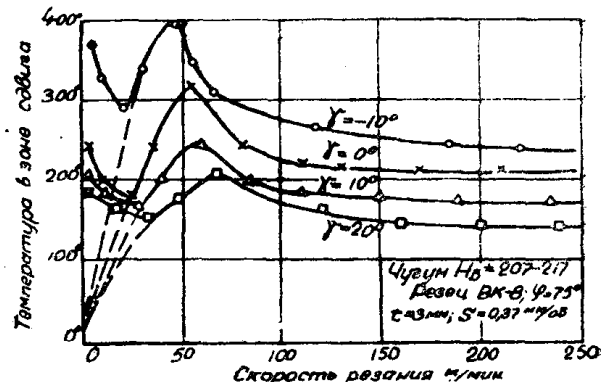
$$c = 0,13 \text{ кал/г}^\circ\text{C},$$

$$t_0^0 = 20^\circ.$$

Воспользовавшись этими значениями, мы по уравнению (5) рассчитали температуры в зоне сдвига для случая резания чугуна с твердостью $H_B = 207-217$ резцами с различными передними углами. Результаты представлены на фиг. 6 в зависимости от температуры на передней грани, а на фиг. 7 в зависимости от скорости резания. Фиг. 6 и 7 показывают, что



Фиг. 6



Фиг. 7

температура в зоне сдвига даже при обработке твердого чугуна и в случае применения резца с углом $\gamma = -10^\circ$ достигает лишь 400° . При больших передних углах она значительно ниже. Для чугунов более низкой твердости она также будет ниже, снижаясь почти прямо пропорционально твердости чугуна, так как удельная работа в зоне сдвига A_{wt} при постоянной температуре на передней грани прямо пропорциональна твердости чугуна.

Фиг. 6 и 7 построены без учета теплоотвода от зоны сдвига. Это привело к некоторым ошибкам. Так, фиг. 6 показывает, что при температурах на передней грани ниже 300° температура в зоне сдвига повышается, причем она по своим значениям превосходит температуру на передней грани резца. Температура на передней грани резца получена измерением методом естественной термопары, температура же в зоне сдвига рассчитана по удельной работе, причем без учета возможности теплоотвода. Трудно представить себе такое положение, чтобы в зоне сдвига температура была выше, чем на

передней грани резца, так как на передней грани осуществляется дополнительный подогрев стружки теплом, выделяющимся в результате трения стружки о переднюю грань.

При уменьшении скорости резания до нуля и температуры как в зоне сдвига, так и на передней грани должны снижаться до комнатной. Поэтому в левой части фиг. 6 и 7 мы провели предположительные прерывистые линии снижения температуры в зоне сдвига.

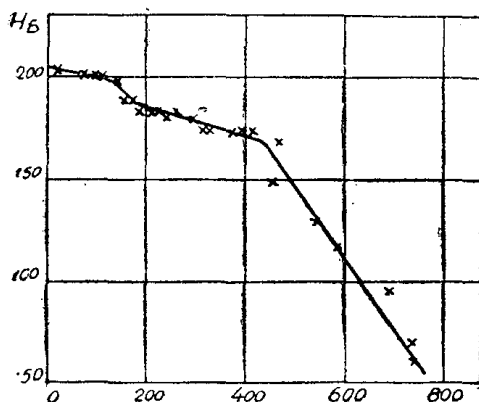
Таким образом, температура в зоне сдвига при повышении скорости резания быстро растет, достигает наивысшего значения при тех значениях скорости резания, при которых температура на передней грани равна 500° , а затем, при дальнейшем повышении скорости резания, заметно снижается.

Влияние температуры на твердость

Для того чтобы проверить, возможно ли снижение механических свойств чугуна под воздействием температур, имеющих место в зоне сдвига, нами было проведено испытание твердости чугуна при различных температурах. Испытание было проведено вдавливанием конуса, изготовленного из твердого сплава ВК—8.

Конус имел угол при вершине 136° . Вдавливание производилось под прессом Бринеля при нагрузке 187,5 кг.

Полученные отпечатки измерялись под инструментальным микроскопом. Для получения чисел твердости по шкале Бринеля предварительно конус был протарирован путем создания его отпечатков на металлах различной известной твердости. На фиг. 8 представлено влияние температуры на твер-



Фиг. 8

дость чугуна. Из этой фигуры следует, что с повышением температуры твердость чугуна падает, причем до температуры в 450° снижение твердости незначительно, при дальнейшем же повышении температуры имеет место быстрое снижение твердости.

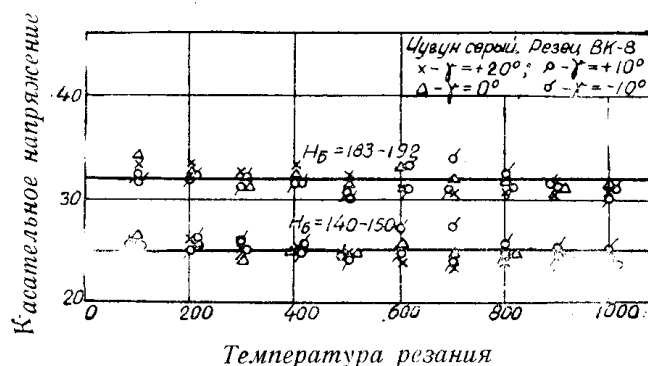
Нас интересует снижение твердости в пределах температуры до 400° , так как мы показали, что температура в зоне сдвига при резании чугуна не превосходит этого значения. Фиг. 8 показывает, что при температуре 400° твердость чугуна в сравнении с первоначальной падает на 15%. В этих пределах возможно и влияние температуры на напряжение в зоне сдвига стружки. При этом следует указать, что тепло и температура в зоне сдвига являются результатом произведенной в этой зоне работы и коль скоро эта работа уже произведена, то выделившееся тепло не может уже оказать влияние на напряжение сдвига, так как сдвиг уже произведен. Напряжение сдвига может быть снижено за счет нагрева металла, лежащего впереди

зоны сдвига, т. е. того объема металла, который вступает в зону сдвига. Нагрев этого объема металла может совершаться путем передачи тепла от зоны сдвига теплопроводностью. Температура в этом объеме металла безусловно будет ниже, чем в зоне сдвига, и в особенности при резании хрупкого металла, когда нагретая стружка при хрупком сдвиге совершенно отделяется от обрабатываемого куска металла, что затрудняет теплопередачу в объем металла, находящийся впереди зоны сдвига. По всем этим соображениям нужно ожидать совершенно незначительного влияния температуры на напряжение в процессе резания, которым, повидимому, можно пренебречь.

Влияние скорости деформации на напряжение при резании чугуна

Определив в процессе резания, силы резания, приложенные, на передней грани резца, измерив угол β_1 , устанавливающий положение плоскости сдвига стружки, мы получили возможность рассчитать касательное напряжение τ в плоскости сдвига. Это касательное напряжение было получено для чугунов различной твердости, различных передних углов резца, при широком диапазоне изменения скоростей резания от 2 до 550 м/мин и широком изменении температур на передней грани и в зоне сдвига.

Значения касательных напряжений в зависимости от скорости резания, переднего угла резца и твердости чугуна отражены на фиг. 9 и 10. Эти фигуры показывают, что напряжения зависят от твердости чугуна и почти совершенно не зависят от скорости резания и от переднего угла резца. Разброс



Фиг. 9

точек в пределах примерно 10%, наблюдаемый на фиг. 9 и 10, может являться результатом экспериментальных ошибок как при определении сил резания, так и углов β_1 . Фиг. 9 и 10 показывают, что при широком диапазоне изменения скорости резания, а значит, и скорости деформации касательное напряжение в плоскости сдвига при резании чугуна является величиной постоянной и не зависящей от скорости деформации.

Это же положение может быть подтверждено сравнением касательных напряжений при резании и при сжатии в момент разрушения сжимаемых образцов. Образцы, имеющие форму цилиндров с отношением высоты к диаметру

$$\frac{h_0}{d_0} = 2,$$

подвергались сжатию под прессом, с фиксированием нагрузки в момент их разрушения. Касательные напряжения при сжатии определялись по соотношению

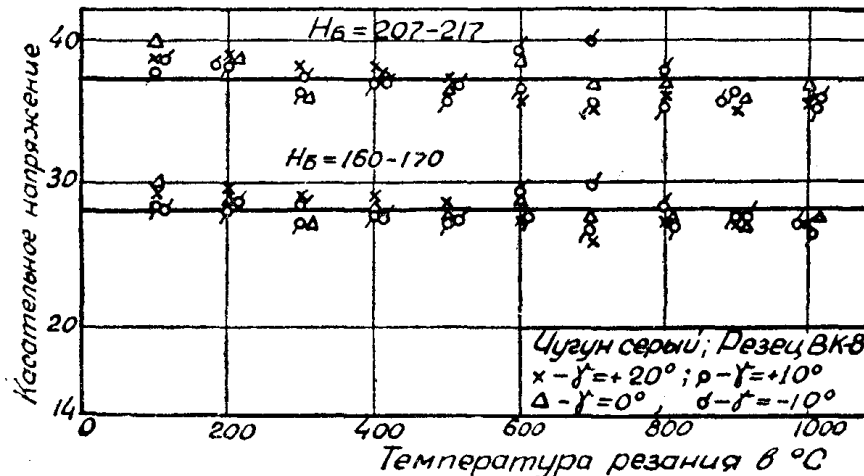
$$\tau = \frac{\sigma}{2},$$

$$\sigma = \frac{P_{сж}}{f},$$

где $P_{сж}$ — сила сжатия,

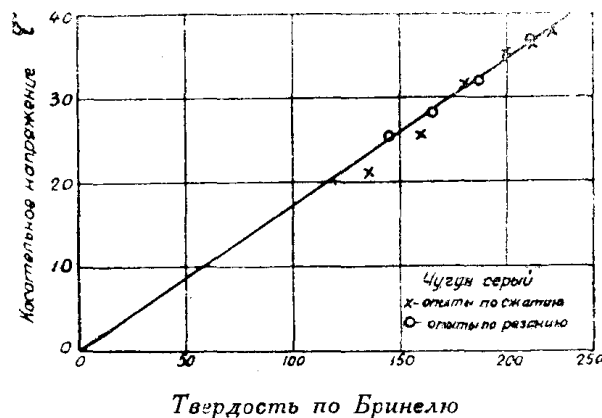
f — площадь поперечного сечения образца в момент разрушения.

На фиг. 11 представлено сопоставление касательных напряжений при резании и при сжатии чугунов различной твердости. Можно констатировать, что касательные напряжения в обоих случаях достаточно хорошо распо-



Фиг. 10

жились относительно одной общей прямой, характеризующей влияние твердости чугуна на касательное напряжение. Таким образом, можно говорить о равенстве касательных напряжений при резании и при сжатии. Резание, как мы показали, производилось с широким диапазоном скоростей от 2 до



Фиг. 11

550 м/мин, сжатие осуществлялось со скоростью порядка 0,0001 м/мин. Отношение скоростей при резании и при сжатии составляло от 20000 до 5500000, и при этом получено равенство касательных напряжений, что также говорит об отсутствии влияния скорости деформации на напряжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Влияние скорости деформации на напряжение при резании пластичных металлов. Статья печатается в настоящем сборнике.