

**ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ ЗАКАЛЕННОЙ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ ШХ15 НА ЕЕ ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

Г. Л. КУФАРЕВ, Н. И. ХОВАХ

(Представлена научным семинаром кафедр технологии машиностроения, станков
и резания металлов)

Влиянию физико-механических характеристик обрабатываемого материала на процесс стружкообразования и его константы посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Стремление ученых связать характеристики металлов, полученные при стандартных испытаниях, с напряжениями и деформациями, возникающими в процессе резания, вполне естественны, ибо в этом случае отпадает необходимость в сложном и трудоемком эксперименте и появляется возможность расчетным путем определить силы резания, назначить наиболее экономичный режим обработки данного материала. Усилия резания чаще всего связываются с характеристиками прочности, пластичности и твердости металла. Особенный интерес представляет зависимость сил резания от твердости, так как определение последней не требует сложного оборудования и значительных затрат времени.

Целью наших исследований и явилось выяснение влияния твердости на процесс стружкообразования при точении стали ШХ-15. Исследованию подвергались заготовки, имеющие различную твердость, полученную, как соответствующей термообработкой, так и предварительной деформацией осевым сжатием.

Твердость закаленной стали была следующая: $HV = 250, 300, 350, 400, 500 \text{ кг/мм}^2$. Наклепанные заготовки имели твердость $HV = 250, 270, 320 \text{ кг/мм}^2$, отожженные без предварительного наклепа — $HV = 197 \text{ кг/мм}^2$.

В первой части работы исследовались физико-механические свойства указанных сталей. Исследования проведены на разрыв и осевое сжатие. Сжатие проведено многоступенчатое со смазкой, что позволило получить значительные пластические деформации и исключило влияние трения на торцах образцов [1]. Испытания на разрыв стандартных образцов из закаленной до различной твердости стали ШХ-15 позволили нам связать твердость образцов с характеристиками прочности и пластичности. Результаты этих испытаний представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, с увеличением твердости пластичность ($\delta\%$; $\Psi\%$) уменьшается значительно интенсивнее, чем растут предел текучести σ_T и предел прочности $\sigma_{пр}$. При твердости $HV = 500$ относительное удлинение и сужение оказывается примерно в 10 раз меньше, чем у сырой стали твердостью $HV = 197 \text{ кг/мм}^2$, в то время как предел текучести и предел прочности увеличились только в три раза.

Таблица 1

№ п. п.	№ обр.	HR_B	HRC	HR_D	HV	σ_T , кг/мм ²	$\sigma_{пр}$, кг/мм ²	δ , %	ψ , %
1	9	61,5	—	33	195	53	62	20	55
2	17	62,9	—	34,3	194	50	59	19	56
3	18	62,9	—	35,5	202	53,7	61,5	18	58
4	5	—	31,6	49,1	305	89	96	15,3	44
5	19	—	32,3	48,5	302	90	97	14,9	44
6	22	—	32,4	49,1	308	88	96	14,5	42
7	1	—	32,7	50,0	309	89,5	96	11,5	38
8	2	—	32,4	48,6	309	90	97	14,4	47
9	6	—	33,7	49,9	312	93	101	15	45
10	12	—	31,9	49,1	312	88	92	9	41
11	8	—	38,5	53,9	358	106	115	11	36
12	20	—	38,7	54,1	362	108	113	64	37
13	16	—	38,7	54,3	366	110	116	5	28
14	7	—	42,7	56,8	406	128	132	5	19
	21	—	43,2	57,6	413	124	131	7,8	28
16	11	—	42,6	57	415	128	128	7,4	17
17	3	—	47,4	60,8	467	153	155	3,6	10
18	4	—	48,5	61,7	484	162	162	3,5	3,3
19	10	—	51,4	64,2	513	170	170	4,6	—
20	14	—	49,3	62,2	514	153	161	—	—
21	13	—	50,4	63,9	525	160	160	—	—
22	15	—	50,4	63,4	525	159	159	—	—

Кривые течения, полученные при сжатии сырой, закаленной и предварительно деформированной стали, представлены на рис. 1. Как следует из кривых течения для сырой и закаленной стали, с ростом интенсивности деформации растет интенсивность напряжения. В области малых деформаций рост интенсивности напряжений с ростом интенсивности деформаций протекает тем быстрее, чем тверже испытываемые образцы. В области больших деформаций зависимости ($\sigma_i = f(e_i)$) имеют прямолинейный характер с примерно одинаковым углом наклона для всех исследуемых образцов вне зависимости от их твердости. Чем выше твердость, тем выше располагаются кривые течения.

Кривые течения для предварительно сжатых образцов в области больших пластических деформаций имеют также прямолинейный характер. Однако в отличие от закаленной стали в этом случае угол наклона кривых течения с ростом твердости уменьшается.

Для твердости $HV = 250 \text{ кг/мм}^2$ наклон кривых течения закаленной и деформированной стали примерно одинаков. При сравнении кривых течения закаленных и предварительно сжатых образцов, имеющих $HV > 250 \text{ кг/мм}^2$, видно, что деформационное упрочнение растет медленнее у последних. Причем отставание роста интенсивности напряжения с ростом интенсивности деформации тем больше, чем выше твердость сравниваемых закаленных и наклепанных образцов.

Сжимаемые образцы вырезались из заготовок, предназначенных для опытов по резанию, так, что вторичное сжатие производилось в том

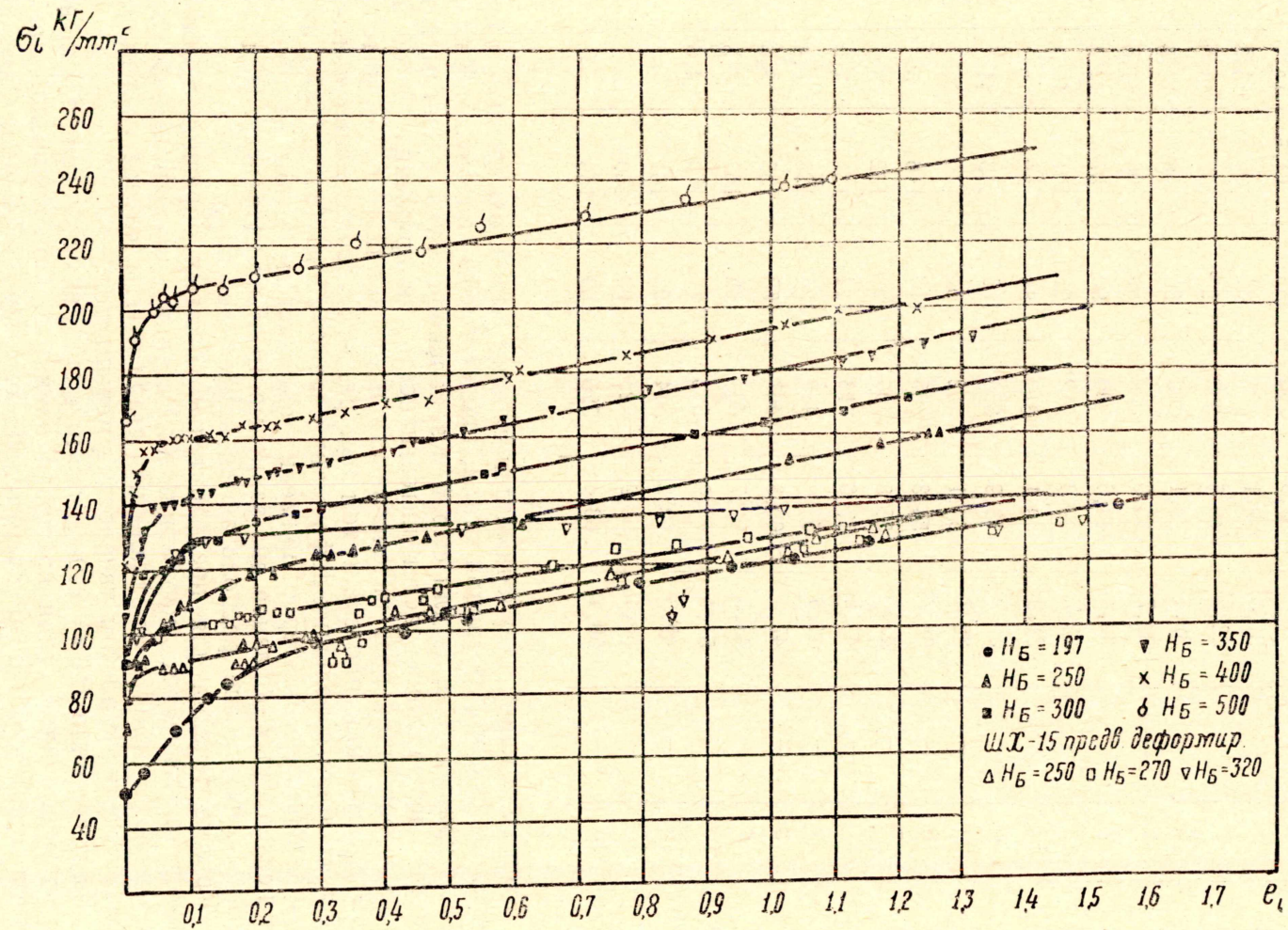


Рис. 1

же направлении, что и предварительная деформация. Таким образом, имеет место простое ступенчатое сжатие. Подтверждением сказанного служит тот факт, что если к деформации, полученной при повторном сжатии, добавить величину предварительного сжатия, то экспериментальные точки зависимости $\sigma_i = f(e_i)$ ложатся на кривую течения, полученную при сжатии сырой стали ШХ15. Исключение составляют несколько точек, соответствующих образцам, имеющим твердость $HV=270$ и 320 кг/мм^2 (на рисунке отмечены вертикальными штрихами). Причиной более низких значений интенсивности напряжений для этих точек является наличие криволинейных участков на кривых течения предварительно деформированных сталей твердостью $HV=270$ и 320 кг/мм^2 . Точки отмеченные вертикальными штрихами, соответствуют точкам, лежащим на криволинейных участках кривых течения, полученных без учета предварительного наклепа.

Полученные экспериментально криволинейные участки зависимости $\sigma_i = f(e_i)$ для образцов, имеющих достаточно большую предварительную деформацию, являются, по нашему мнению, результатом прошедшего отдыха.

Процесс отдыха проходит тем полнее, чем длительнее время отдыха и больше деформация [2]. В нашем случае испытания на сжатие проводились спустя 6 месяцев после предварительной деформации. Такой длительный срок, как нам думается, вполне достаточен для отмеченного разупрочнения, которое тем больше, чем больше твердость образцов, а, значит, больше предварительный наклеп.

Следует заметить, что криволинейные участки на кривых течения при повторном сжатии сталей получены и в опытах А. М. Розенберга и А. Н. Еремина [3], а также в работе [4].

Измерение твердости в диаметральном сечении сжатых образцов позволило определить связь между твердостью, напряжением и деформацией.

Зависимость твердости сжатых образцов от напряжения представлена на рис. 2. С разбросом, не выходящим за пределы точности эксперимента, в области больших пластических деформаций связь между твердостью и напряжением выражается уравнением

$$\sigma_i = 0,37 HV.$$

Отклонение от этой зависимости тем больше, чем меньше деформация сжатия. Если не считать точки, соответствующие соотношению твердости и предела текучести (отмеченные на рис. 2 штрихами), то погрешность не превышает 10%.

При более детальном рассмотрении описываемой зависимости отдельно для каждого материала, учитывая и связь твердости с пределом текучести исходного материала, обнаруживается следующее:

1. Каждый материал имеет свою кривую $\sigma_i = f(HV)$.
2. Общая зависимость для всех материалов близка к огибающей.
3. Наибольшие отклонения от общей кривой имеют место при малых деформациях.

Аналогичную зависимость твердости деформированных образцов от интенсивности напряжения для различных черных и цветных металлов получил ранее Г. Д. Дель [5].

Если связь между σ_i и HV в области больших пластических деформаций удовлетворительно выражается однозначной функцией независимо от твердости, то зависимость твердости и интенсивности деформации для каждого материала выражается своей кривой во всем диапазоне деформаций (рис. 3). Чем выше исходная твердость, тем больше твердость образцов после сжатия.

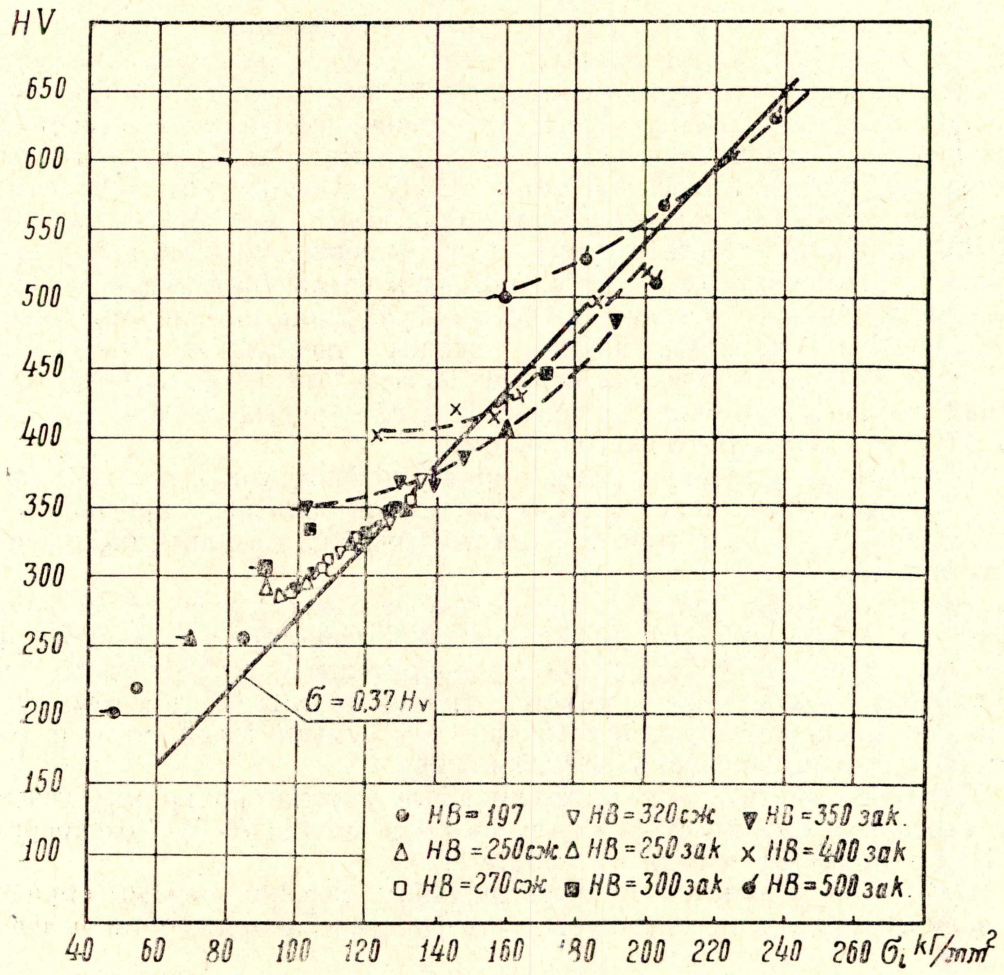


Рис. 2

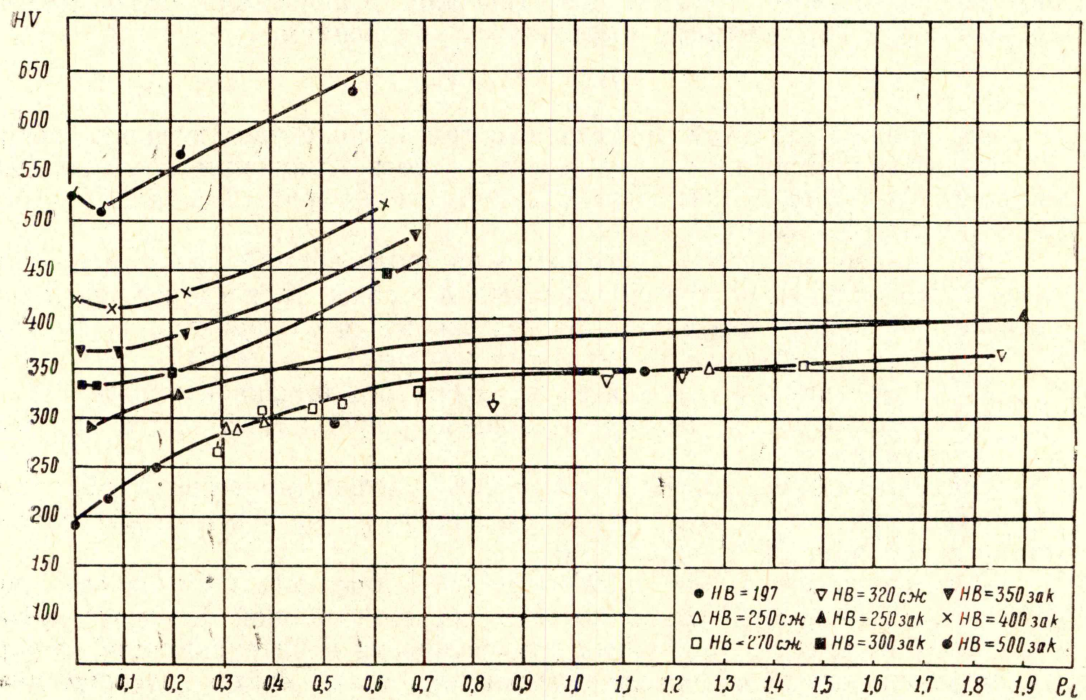


Рис. 3

Характер и угол наклона кривых $HV = f(e_i)$ для образцов, имеющих исходную твердость $HV \geq 300$, примерно одинаков. Сталь, закаленная до твердости $HV = 250$, имеет более плавную кривую, обращенную выпуклостью вверх. Зависимость $HV = f(e_i)$ для образцов, не прошедших термическую обработку, выражается общей кривой, что вполне закономерно, так как в этом случае мы имеем простое многоступенчатое сжатие.

Явление разупрочнения, о котором говорилось выше, на рассматриваемой кривой обнаруживается в точках, отмеченных вертикальными штрихами. Как следует из графиков, для образцов твердостью $HV \geq 300$ наблюдается уменьшение твердости на образцах, получивших деформацию в пределах от $e_i = 0,05$ до $e_i = 0,1$.

Аналогичные результаты получены в опытах П. Бриджмена [1]. Результаты наших опытов совпали с результатами опытов П. Бриджмена, несмотря на отличие в методике. Мы измеряли твердость не на торце одного образца после каждой ступени сжатия, как это делал П. Бриджмен, а в диаметральном сечении нескольких образцов, каждый из которых был сжат до различной степени деформации. Указанное явление П. Бриджмен считает возможным как результат эффекта Баушингера.

Наши измерения твердости проведены в плоскости, перпендикулярной к торцу образца, поэтому деформация сжатия от внедрения индентора не накладывается на предшествующую деформацию растяжения. Это дает нам основание заявить, что предположение П. Бриджмена о причинах падения твердости с ростом деформации нашими опытами не подтверждается.

Во второй части работы проведены опыты по резанию закаленной и предварительно деформированной стали. Опыты проведены при точении резцами с механическими креплениями пластинки твердого сплава Т15К6. Геометрия заточки была следующая: передний угол принимался $\gamma = +10^\circ; 0^\circ; -10^\circ$, остальные углы заточки постоянные и равные $\varphi = 75^\circ, \varphi_1 = 15^\circ, \alpha = \alpha_1 = 10^\circ, \lambda = 0^\circ$, радиус закругления вершины резца $r = 0,3$ мм.

Измерение сил резания производилось упруго-электрическим динамометром с индуктивными датчиками [6]. Как показали наши опыты, зависимость сил резания от скорости как для закаленной, так и для предварительно сжатой до разной твердости стали ШХ-15 выражается так называемой типичной кривой, характерной при резании обычной сырой стали.

При точении предварительно деформированной стали при постоянной скорости резания все три составляющие силы резания оказываются меньше, чем при обработке ненаклепанной ($HV = 197$ кг/мм²), и тем меньше, чем больше твердость предварительно сжатого обрабатываемого материала.

При обработке закаленной стали силы резания не зависят от твердости и примерно равны силам, возникающим при точении стали $HV = 197$ кг/мм².

Исключение составляет резание стали, закаленной до твердости $HV = 250 - 300$ кг/мм². В этом случае силы резания оказываются несколько большими, чем при обработке сырой и закаленных до твердости $HV = 300 - 500$ кг/см² [7].

Сравнение составляющих силы резания, возникающих при обработке стали ШХ-15 одной и той же твердости, полученной термической обработкой и предварительной деформацией, показывает, что силы P_z, P_x, P_y больше в случае резания закаленных сталей.

Все указанные зависимости сил резания от скорости для закаленной и предварительно деформированной стали ШХ-15 имеют место в широком диапазоне подач ($S = 0,056 - 0,708$ мм/об) и при любом из принятых нами значений переднего угла реза.

На рис. 4 представлена зависимость главной составляющей силы, действующей на передней грани резца, от скорости резания для закаленной и деформированной до разной твердости стали. (Разделение сил резания на силы, действующие на передней и задней гранях инструмента, произведено по методу проф. А. М. Розенберга [8]).

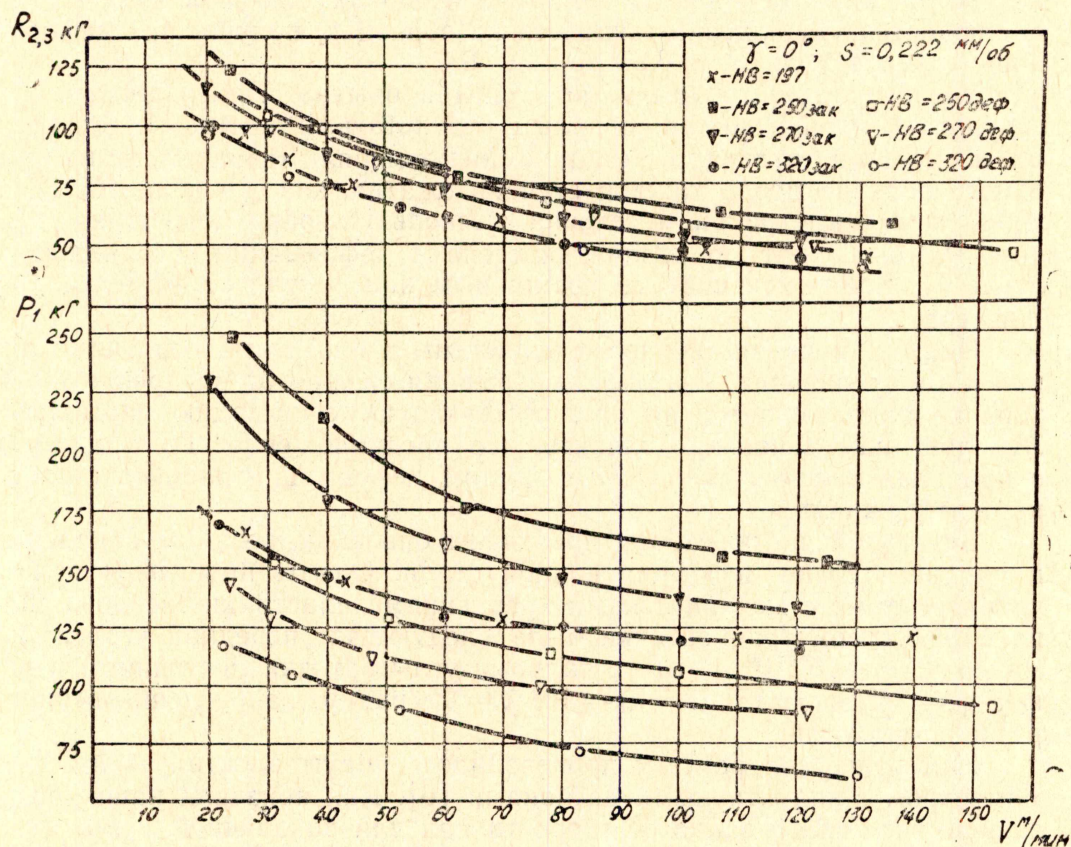


Рис. 4

Как следует из графика, все высказанные выше закономерности, относящиеся к силам резания, замеренным динамометром, в полной мере можно отнести и к вертикальной проекции силы, действующей на передней грани резца. Для равнодействующей горизонтальных проекций сил, действующих на передней грани инструментов ($R_{2,3}$), эта закономерность выражена нечетко. В этом случае при равной твердости закаленной и предварительно сжатой стали разница в силах оказывается незначительной или отсутствует совсем. Такое нивелирование силы $R_{2,3}$ для закаленной и деформированной стали происходит потому, что силы на задней грани инструмента, которые при точении закаленной стали выше, чем при обработке наклепанной, оказывают значительно большее влияние на горизонтальные проекции силы резания, чем на вертикальную. С ростом твердости силы на задней грани увеличиваются, причем перепад их для закаленных и предварительно сжатых сталей больший для нормальной составляющей, чем для касательной, и тем больший, чем больше твердость обрабатываемого материала.

Если при точении закаленных сталей силы резания оказались большими, чем при точении деформированных до той же твердости сталей, Однако, как показали наши опыты (рис. 5), усадка стружки то следовало ожидать аналогичную зависимость и для усадки стружки. ζ при точении наклепанных сталей оказалась выше, чем для закаленных. Причем эта разница тем больше, чем меньше твердость стали.

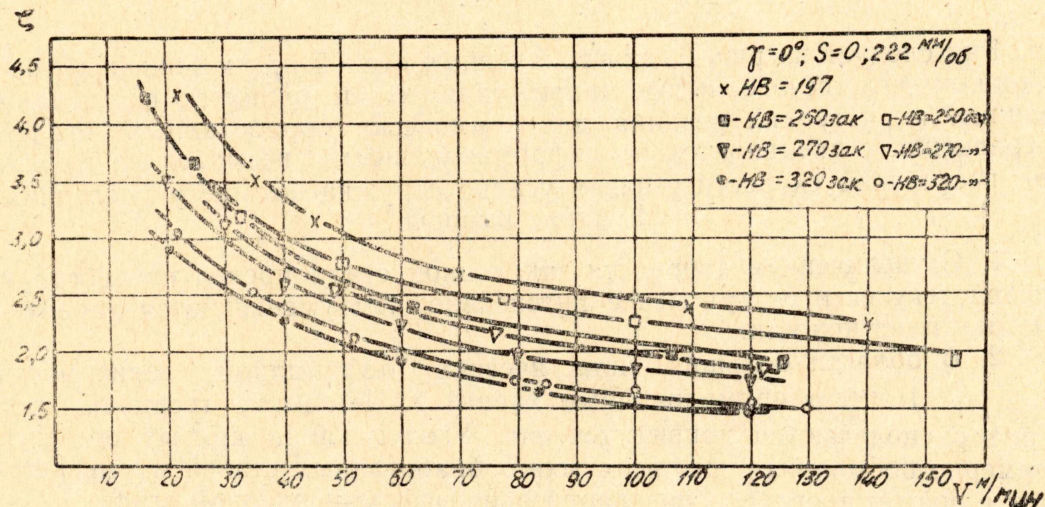


Рис. 5

Причину этого кажущегося на первый взгляд несоответствия, усугубляющегося еще тем, что коэффициент трения при точении деформированных сталей при той же усадке выше, чем при точении закаленных, удалось выяснить опытами по сжатию.

На кривые течения (рис. 6), полученные при сжатии наклепанной и закаленной стали, нанесены точки зависимости $\sigma_i = f(e_i)$, рассчитан-

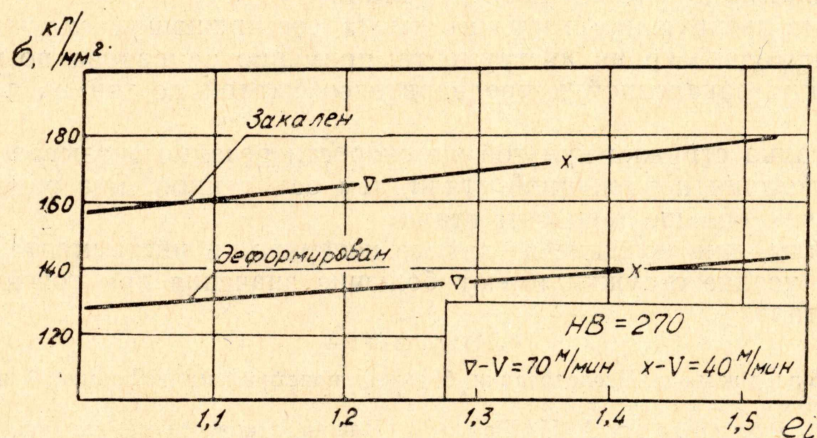


Рис. 6

ные по опытам резания. Интенсивность деформации при резании получена путем пересчета относительного сдвига ε , рассчитанного по уравнению

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cdot \cos \gamma}, \quad (1)$$

в истинный сдвиг g по формуле Надаи [9]

$$g = \ln \left[1 + \frac{\varepsilon}{2} [(\varepsilon + \sqrt{4 + \varepsilon^2})] \right], \quad (2)$$

а затем в интенсивность деформации

$$\zeta_i = \frac{g}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Как следует из рис. 6, для закаленных сталей при меньшей деформации имеют место большие напряжения, что и приводит, по нашему мнению, к росту сил резания для термически обработанных сталей в сравнении с предварительно деформированными, несмотря на то, что при постоянной скорости резания усадка стружки больше у последних.

Краткие выводы

1. С увеличением твердости закаленной стали предел прочности и предел текучести растут менее интенсивно, чем уменьшаются характеристики пластичности.

2. В области больших пластических деформаций зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon)$ имеет прямолинейный характер. Чем выше твердость, тем выше располагаются кривые течения. Угол наклона кривых остается примерно постоянным для всех термообработанных сталей и уменьшается с ростом твердости предварительно деформированной стали.

3. Зависимость твердости от интенсивности напряжения в области больших пластических деформаций может быть выражена уравнением $\sigma_i = 0,37 HV$ для всех исследуемых сталей.

4. Зависимость твердости от интенсивности деформации выражается общей кривой для всех не прошедших термическую обработку образцов.

5. При точении закаленной стали силы резания, измеренные динамометром, и вертикальная составляющая сил, действующей на передней грани резца (при $V = \text{const}$), больше, чем при резании предварительно сжатой до той же твердости стали.

6. Результирующая горизонтальных составляющих сил, действующих на передней грани инструмента, примерно одинакова по величине при точении закаленной и предварительно сжатой до той же твердости стали.

7. Усадка стружки при той же скорости резания оказывается больше при резании наклепанной стали, чем закаленной. Эта разница тем меньше, чем больше твердость стали.

8. Силы, действующие на задние поверхности инструмента, при постоянной усадке стружки имеют большие значения при точении закаленной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Бриджмен. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. ИЛ. М. 1955.
2. А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. Влияние скорости деформации на напряжения в процессе резания пластичного металла. Изв. ТПИ, т. 75. 1954.
3. Резание металлов и инструмент, под ред. А. М. Розенберга. Машиностроение. М. 1964.
4. Прочностные резервы металлургического и машиностроительного оборудования. Волго-Вятский СНХ. 1965.
5. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости. Диссертация. Томск. 1965.
6. А. М. Розенберг, Н. И. Ховах, В. И. Лившиц. Токарный динамометр для измерения усилий до 2 тонн. Станки и инструмент, № 9. 1964.
7. Н. И. Ховах. Влияние твердости стали ШХ-15 на процесс стружкообразования. Изв. ТПИ, т. 147.
8. А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов. Машгиз. 1956.
9. А. Надаи. Пластичность и разрушение тел. ИЛ. 1954.