

Г. А. АРУТЮНЯН

О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ЗА ЛИНИЕЙ СРЕЗА

Современный этап развития машиностроения характеризуется применением деталей машин, к рабочим поверхностям которых предъявляются высокие эксплуатационные свойства.

Ввиду того, что в настоящее время завершающей операцией получения готовых деталей является процесс резания, то изучение качества поверхностного слоя при резании, обуславливающего долговечность детали в целом, приобретает особое значение.

Упрочнение, как один из важных параметров качества обработанной поверхности, оказывает влияние не только на показатели долговечности деталей. Оно во многом обуславливает стойкость режущего инструмента и имеет технологическое значение при расчете сечения среза при последующей обработке.

Явлению упрочнения при резании посвящены многочисленные работы. Труды [1—9] внесли большой вклад в изучение основных закономерностей упрочнения металла за линией среза и прирезцового слоя, механизма возникновения и распределения остаточных макронапряжений и микроструктуры предрезцовой и подрезцовой зон резания.

Установление конкретных зависимостей изменения характеристик упрочнения обработанной поверхности при изменении ряда важных параметров резания и на базе этих исследований обобщение некоторых теоретических положений процесса упрочнения приведены также в работах [10—14] и других.

В упомянутых выше работах изучено влияние почти всех условий резания, включающих геометрические параметры инструмента и режимов резания, на характеристики упрочнения обработанной поверхности. Установлена физическая сущность изменения степени и глубины упрочнения металла за линией среза, связь между степенью упрочнения прирезцового слоя стружки и степенью упрочнения поверхности, приведены различные механизмы относительно механизма упрочнения металла за линией среза.

С другой стороны, обзор и анализ приведенных, а также ряда других исследований показывает, что не проведено комплексное исследование процесса резания: динамических показателей процесса резания, характеристик упрочнения поверхности и стружки и взаимосвязи между ними. В большинстве случаев степень и глубина упрочнения металла за

линией среза изучаются в отрыве от процесса стружкообразования, от напряженно-деформированного состояния срезаемого слоя. Слабо изучено влияние некоторых важных геометрических параметров резца и, в особенности, главного угла в плане, на упрочнение поверхности. При чем они оказывают косвенное влияние на упрочнение металла за линией среза: через изменения толщины и ширины среза и износа режущего инструмента.

Влияние глубины резания на упрочнение поверхности нуждается в серьезном уточнении. Объяснение некоторых явлений, сопутствующих процессу резания, влиянием скорости деформации в основном носит качественный характер.

В настоящее время основным показателем оценки степени упрочнения металла является величина его твердости. Плотность дислокаций, как основной показатель оценки роли дислокаций при упрочнении металла, является другим важным критерием, характеризующим степень упрочнения.

Однако, кроме некоторых работ [15, 16, 17], не проведено экспериментальных исследований для определения плотности дислокаций поверхности в зависимости от условий резания. Между тем так как деформационное упрочнение в настоящее время трактуется с позиций дислокационной теории упрочнения, то только исходя из указанной теории можно правильно объяснить физическую сущность явления упрочнения и разупрочнения при резании металлов.

В работе на базе проведенных экспериментальных и теоретических исследований сделана попытка установить физическую сущность упрочнения и разупрочнения металла в предрезцовой и подрезцовой зонах резца, в зависимости от изменения условий резания в широких пределах.

§ 1. Методика проведения экспериментов

Здесь коротко излагается применяемая методика при проведении исследований. Исследованию подвергался ряд металлов, сильно отличающихся процентным содержанием углерода: железо Армко, сталь СТЗ, стали 45, 40Х, У8А. В качестве режущего инструмента применялись проходные резцы, оснащенные пластинками из твердого сплава Т5К10.

Опыты проведены на гидрофицированном поперечно-строгальном станке модели 7М36. Для измерения составляющих силы резания использован 3-компонентный динамометр принципиальной конструкции ЦНИИТМаш.

В качестве фиксирующих приборов применялись осциллограф типа Н-102 при строгании и электронные автоматические самопишущие потенциометры с записью на диаграммной ленте ЭПП-09М1 — при точении.

Для оценки степени и глубины упрочнения нами принят метод микротвердости. Исследования проводились на микротвердомере типа ПМТ-3, причем микротвердость измерялась на плоскости специально изготовленных лысок.

В работе основным методом исследования кристаллической структуры принят рентгеноструктурный анализ. Определялась плотность дефектов кристаллической решетки (дислокаций) обработанной поверхности. Исследования проводились на ионизированной рентгеновской установке УРС-50И на железном излучении. Записывались интерференционные линии (110), так как влияние дисперсности блоков на физическое уширение интерференционных линий проявляется сильнее на линии (100); $\Theta_{110} = 28^\circ$ [18].

Формула для определения плотности дислокаций по расширению линий на рентгенограммах имеет вид [19]

$$\rho_1 = \frac{K}{Fb^2} \beta^2 \quad (1)$$

После упрощения она принимает вид [20]

$$\rho_1 = A\beta^2 \text{ см}^{-2}, \quad \text{где} \quad A = 2 \times 10^{16}. \quad (2)$$

Физическое уширение интерференционных линий определялось по методу, описанному в работе [20]. В качестве исследуемой выбрана обработанная поверхность. Количество остаточного аустенита в поверхностном слое при обработке стали У8А определено также рентгеновским методом по методике, разработанной во Всесоюзном научно-исследовательском институте подшипниковой промышленности (ВНИИПП) [21].

§ 2. К вопросу об упрочнении поверхности в зависимости от параметров среза*

Эксперименты проводились при точении, с целью изучения характеристик упрочнения поверхности резания и обработанной поверхности, при изменении главного угла в плане резца φ и глубины резания.

Величины указанных параметров изменялись соответственно от 15° до 75° и от 0,5 до 3,5 мм. Одновременно записывались составляющие силы резания на установке ЭПП.

Заранее перед опытами на образцах обтачивались поверхности резания для каждого значения угла φ и глубины резания в отдельности, при одних и тех же условиях резания.

Для повышения точности измерения контактной площади соприкосновения стружки с передней поверхностью резца перед экспериментами на передние поверхности резцов наносился раствор медного купороса. После записи сил резания, для исследования характера упрочнения металла поверхности резания и за линией среза, образцы разрезались на отдельные куски с целью изготовления шлифов.

* Часть содержания ранее была опубликована [22]. Однако ввиду того, что настоящая работа носит комплексный характер, для обобщения некоторых результатов исследований необходимо включение в нее указанной части.

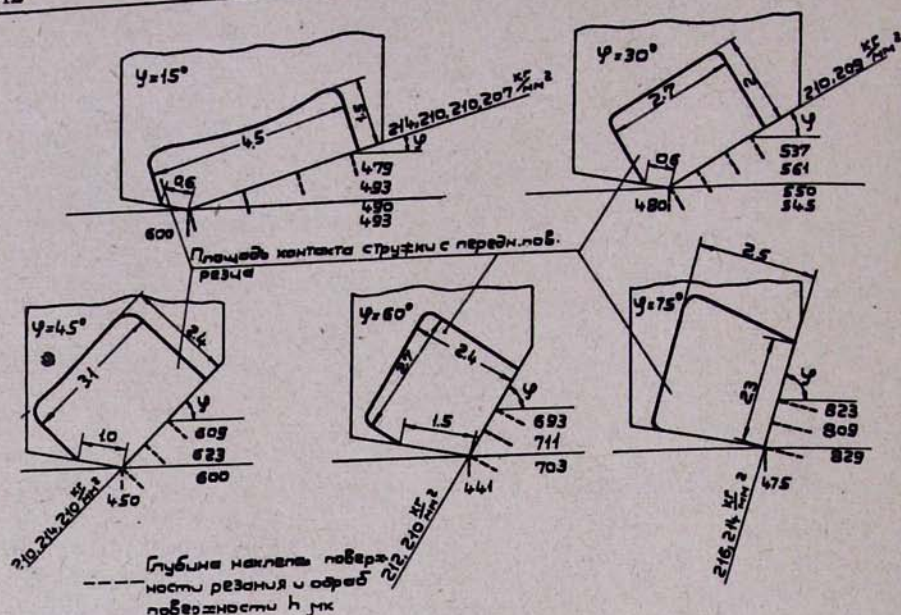


Рис. 1. Влияние главного угла в плане φ резца на микротвердость и глубину упрочнения обработанной поверхности и поверхности резания (мат. сталь СТЗ, $V = 8 \text{ м/мин}$, $S = 0,52 \text{ мм/об}$, $t = 1,0 \text{ мм}$).

Результаты исследований приведены на рис. 1 и 2. Данные экспериментов показывают, что с увеличением угла в плане φ глубина упрочнения поверхности резания непрерывно возрастает, между тем как при увеличении глубины резания значения ее почти не меняются.

При этом исключительно важной особенностью приведенных данных опытов является равномерный характер распределения степени и глубины упрочнения в каждой точке вдоль главной режущей кромки резца. Это явление не изменяется при различных значениях величин φ и t . С другой стороны, увеличение угла приводит к горбообразному характеру изменения глубины упрочнения за линией среза, причем наибольшее ее значение, 600 мк , получается при $\varphi = 15^\circ$, а наименьшее значение, 441 мк , — при $\varphi = 60^\circ$. Увеличение глубины резания, как видно из рис. 2, приводит к значительному увеличению глубины упрочнения обработанной поверхности: от 390 мк при $t = 0,5 \text{ мм}$ до 507 мк при $t = 3,5 \text{ мм}$. Площадь контакта стружки с передней поверхностью резца с увеличением параметров φ и t также изменяется, причем характерно, что она при этом в большей степени охватывает длину вспомогательной режущей кромки резца.

Исходя из полученных закономерностей, можно предсказать, что причиной возрастания глубины упрочнения поверхности резания при увеличении угла φ является увеличение толщины среза и проекции осевой силы P_x , действующей перпендикулярно главной режущей кромке резца.

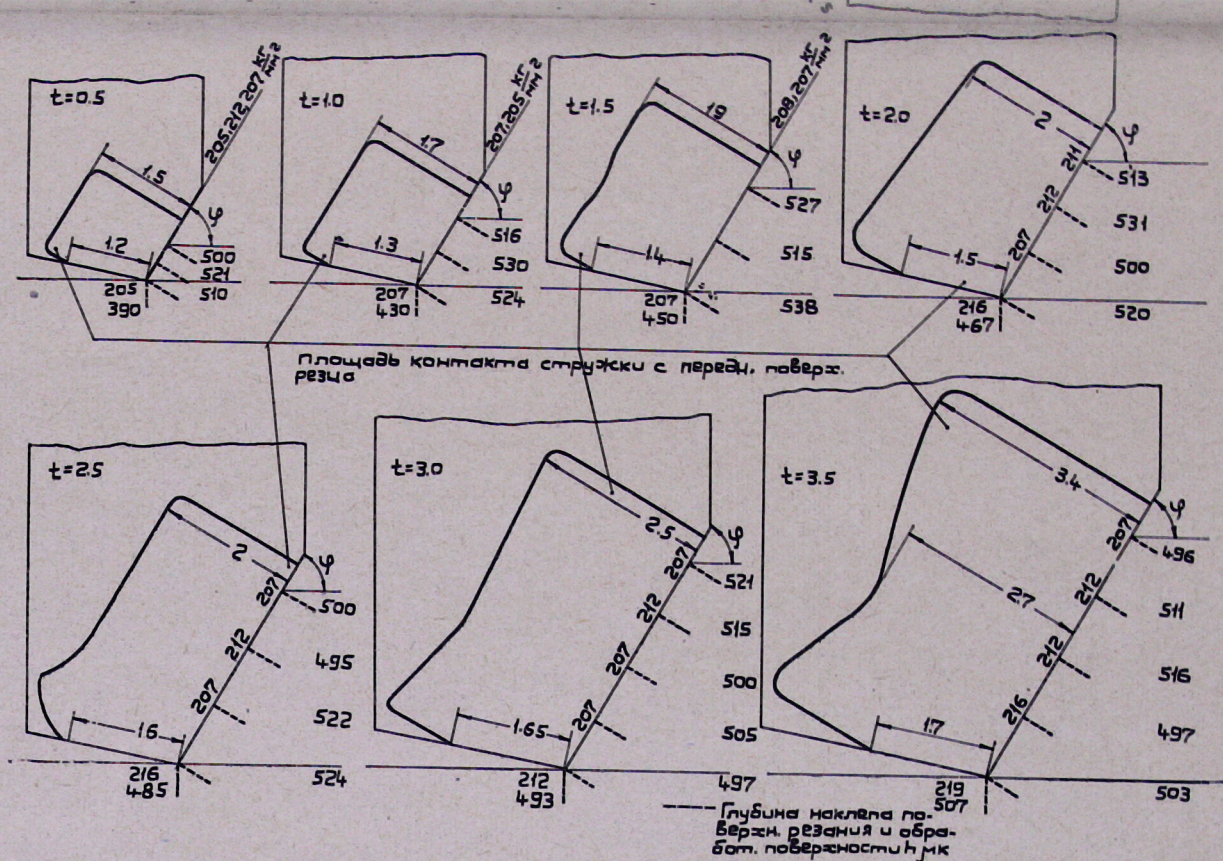


Рис. 2. Влияние глубины резания t на микротвердость и глубину упрочнения обработанной поверхности и поверхности резания (мат. сталь СТЗ, $V = 8 \text{ м/мин}$, $S = 0,26 \text{ мм/об}$, $\varphi = 60^\circ$).

Следует предположить также, что глубина резания (ширина среза) не должна влиять на степень и глубину упрочнения поверхности резания. Это логично и исходит из того факта, что с увеличением ширины среза прямо пропорционально возрастают силы резания, что, кстати, подтверждается также нашими экспериментами.

Чтобы обосновать изложенные предположения, нами определена величина условной удельной силы резания, действующая на единицу длины главной режущей кромки. Ввиду того, что (как сказано выше) характеристики упрочнения поверхности резания в каждой точке вдоль главной режущей кромки резца не отличаются друг от друга, то величину условной удельной силы резания p можно определить выражением

$$p = \frac{P}{b}, \quad (3)$$

где

$$P = \sqrt{(P'_z + P'_y + P'_x)^2 + P_z'^2},$$

b —ширина среза.

Силы P'_z , P'_y и P'_x действуют на передней поверхности резца в одном направлении, перпендикулярно главной режущей кромке резца. Они деформируют металл поверхности резания, соответственно равны:

$$\begin{aligned} P'_z &= P_z \sin \gamma, \\ P'_y &= P_y \cos \varphi \cos \gamma, \\ P'_x &= P_x \sin \varphi \cos \gamma; \end{aligned} \quad (4)$$

и суммируются арифметически.

Сила P'_z направлена перпендикулярно равнодействующей сил P'_z , P'_y и P'_x :

$$P_1 = P'_z + P'_y + P'_x. \quad (5)$$

Она определяется зависимостью

$$P'_z = P_z \cos \gamma. \quad (6)$$

Ниже, в табл. 1 и 2, приведены значения условной удельной силы p , подсчитанные по (3), в зависимости от изменения параметров φ и t .

Как показывают полученные данные, с увеличением угла φ проекции сил P'_z и P'_y , а также равнодействующая P уменьшаются. При этом сила P'_x , наоборот, увеличивается, а удельная сила p возрастает почти в два раза. Причиной увеличения последней является то, что с увеличением угла в плане равнодействующая сила P уменьшается в меньшей степени, чем ширина среза b .

С другой стороны, с увеличением угла φ возрастает толщина среза, которая способствует увеличению пластически деформированной зоны металла за поверхностью резания.

Следовательно, причиной увеличения глубины упрочнения поверхности резания при увеличении угла в плане является одновременное увеличение толщины среза и удельной силы p .

Таблица 1

φ°	15°	30°	45°	60°	75°
P'_z кг	42,6	24,7	24	22,6	23
P'_y кг	114,2	66,5	47,3	30,5	16
P'_x кг	5,1	14,8	24,4	32,4	41
P''_z кг	241,0	140,0	136,0	128,0	130
P кг	290,0	175,6	166,0	159,0	154
p кг/мм	75,0	88,0	117,0	138,0	148

$$V = 8 \text{ м/мин}$$

$$S = 0,52 \text{ мм/об}$$

$$t = 1 \text{ мм}$$

Математическая обработка результатов экспериментальных данных глубины упрочнения поверхности резания h_n и удельной силы резания p дает степенную функцию в виде:

$$h_n = p^x,$$

где

$$x = 1,35 - 1,40.$$

(7)

Таблица 2

$t, \text{ мм}$	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3	3,5
P'_z кг	7,3	12,2	17,9	25,2	29,9	38,3	43,5
P'_y кг	11,3	14,8	19,7	27,0	30,5	35,5	39,0
P'_x кг	12,8	23,0	29,9	44,4	51,2	71,7	76,0
P''_z кг	41,4	69,0	101,5	143,0	169,0	217,0	246,0
P кг	52,0	85,0	122,0	172,6	203,0	260,0	293,0
p кг/мм	80,4	73,8	70,5	74,5	70,5	75,0	73

$$V = 8 \text{ м/мин},$$

$$S = 0,26 \text{ мм/об},$$

$$\varphi = 6^\circ$$

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что при увеличении глубины резания проекции силы резания P'_z , P'_y , P'_x и P''_z , а также их равнодействующая P , возрастают. При этом удельная сила p почти не меняется. Это говорит о том, что вышеуказанные силы с увеличением глубины t возрастают прямолинейно. Следовательно, ширина среза не должна влиять и на удельную работу резания, что установлено Н. Н. Зоревым [23]. А упрочнение, в конечном счете, результат не только силы реза-

ния, но и удельной работы резания, необходимой для пластической деформации металла.

Установленный характер изменения характеристик упрочнения поверхности резания при изменении угла в плане и независимость величин степени и глубины упрочнения поверхности резания от изменения глубины резания позволяют нам уточнить механизм упрочнения металла за линией среза при изменении угла φ , подачи и глубины резания.

Можно установить, что при уменьшении угла в плане φ реза основной причиной увеличения глубины упрочнения обработанной поверхности является положение главной режущей кромки относительно линии среза. Несмотря на то, что с уменьшением угла φ , вследствие уменьшения толщины среза, глубина упрочнения поверхности резания уменьшается, происходит такое изменение ориентации главной режущей кромки реза относительно линии среза, что упрочнение в большей степени распространяется в глубь обработанной поверхности за линией среза.

Увеличение характеристик упрочнения обработанной поверхности в пределах изменения угла $\varphi = 60^\circ \div 75^\circ$ следует объяснить активным влиянием вспомогательной режущей кромки реза, несмотря на значительное удаление положения режущей кромки от линии среза. Как видно из рис. 1, при этом в значительной степени возрастает ширина контакта стружки с передней поверхностью реза, охватывающая большую часть вспомогательной режущей кромки. В результате увеличивается зона действия контактных напряжений вдоль вспомогательной режущей кромки реза. Ввиду того, что вспомогательный передний угол $\gamma_{всп.}$ почти равен нулю (расчеты $\gamma_{всп.}$ здесь не приводятся), указанные контактные напряжения в большей степени распространяются в глубь металла за линией среза, тем самым увеличивая степень и глубину упрочнения обработанной поверхности.

Общеизвестно, что с увеличением подачи возрастает длина вспомогательной режущей кромки реза, участвующей в процессе резания. Роль этой кромки в процессе образования стружки становится особо заметной, даже доминирующей, при отношении подачи к глубине резания больше единицы.

В таких случаях, согласно Ю. С. Шарину [24] и ряду других авторов, изменение подачи будет вызывать изменение ширины среза, а изменение глубины резания — изменение толщины среза.

Исходя из этого, увеличение подачи в нашем случае от 1,25 до 3 мм/дв. ход (данные здесь не приведены), когда глубина резания равна $t=1$ мм, будет характеризовать не изменение толщины среза, а изменение ширины среза. При таком изменении ширины среза (от 1,25 до 3 мм) глубина упрочнения обработанной поверхности (т. е. в данном случае и поверхности резания), при обработке стали СТЗ, по нашим данным, возрастает от 590 до 758 мк. С другой стороны, увеличение ширины среза, как изложено выше, совершенно не влияет на глубину упрочнения поверхности резания при обработке той же стали.

Таким образом, при увеличении подачи упрочнение металла за линией среза характеризует не общее возрастание длин главной и вспомогательной режущих кромок, как утверждает ряд авторов, а увеличение толщины среза, способствующее распространению зоны пластической деформации в глубь металла, перед передней поверхностью резца.

Следовательно, толщина среза является одним из активных физических параметров процесса резания, оказывающих интенсивное влияние на степень и глубину упрочнения обработанной поверхности.

Выше было сказано, что увеличение глубины резания приводит к некоторому возрастанию степени и глубины упрочнения обработанной поверхности. По-видимому, это объясняется увеличением зоны действия (по вспомогательной режущей кромке резца) контактных удельных сил резания на передней поверхности резца и краевым эффектом.

Дальнейшие исследования имеют цель установить, каким образом изменяются характеристики упрочнения обработанной поверхности при различных значениях подачи. Исследования проводились при строгании, в диапазоне изменения подачи от 0,25 до 3 мм/дв. ход. Данные опытов приведены на рис. 3.

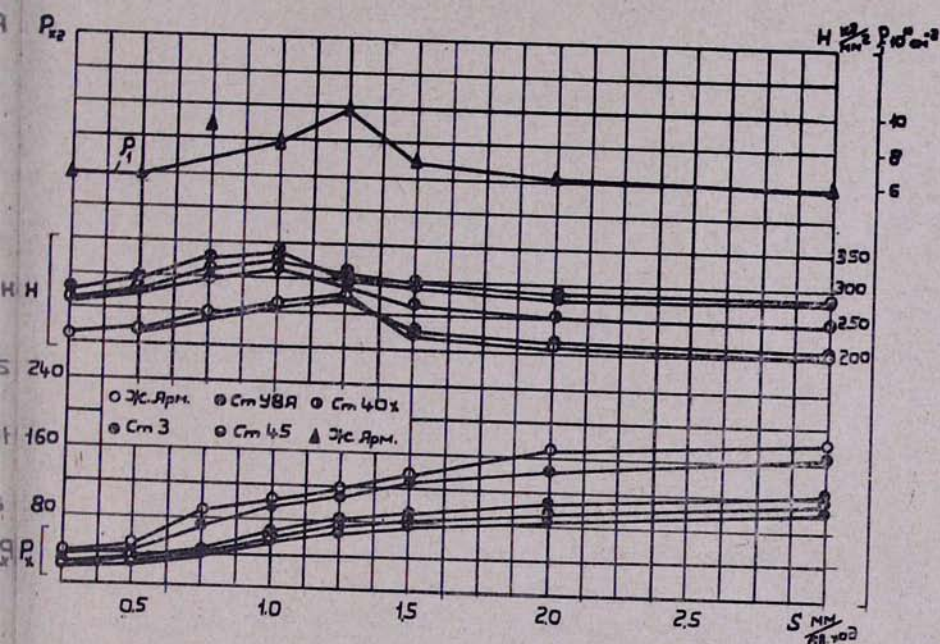


Рис. 3. Зависимость осевой силы P_x , микротвердости и плотности дислокаций (H , ρ_1) поверхности от подачи (строгание, $V = 8 \text{ м/мин}$, $t = 1,0 \text{ мм}$).

Как видно, характер изменения глубины упрочнения металла за линией среза не отличается от характера изменения составляющих силы резания (здесь представлена только осевая сила P_x). Между тем, микротвердость и плотность дислокаций обработанной поверхности во всем диапазоне увеличения подачи не всегда возрастают. Идентичный харак-

тер изменения сил резания, микротвердости и плотности дислокаций поверхности, начиная с определенных значений подачи (для железа Армо $S=1,25$ мм/дв. ход), нарушается, и величина последних двух в значительной степени уменьшается до значений подачи, равных 1,5 мм/дв. ход. Дальнейшее увеличение подачи приводит уже к небольшому снижению микротвердости и плотности дислокаций.

Как показывают данные исследований, при подаче, равной 1,25 мм/дв. ход., для железа плотность дислокаций поверхности равна $10 \cdot 2 \cdot 10^{10}$ см⁻², а при подаче 1,5 мм/дв. ход. плотность принимает уже значение $7 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Микротвердость поверхности при этом соответственно принимает величины 281 и 218 кг/мм². Указанное интенсивное разупрочнение поверхности, на наш взгляд, можно объяснить, исходя из следующих соображений.

С увеличением толщины среза, вследствие непропорционального возрастания ширины контакта стружки с передней поверхностью резца, как показано Н. Н. Зоревым [23], удельные нормальные силы возрастают. Увеличение подачи приводит также к повышению средней температуры контакта резца с обрабатываемым металлом. Одновременно возрастает степень деформации обработанной поверхности, в частности плотность дислокаций и микротвердость поверхности.

Как сказано выше, при подаче, равной 1,25 мм/дв. ход., плотность дислокаций так сильно повышается, что в данных условиях деформации происходит насыщение упрочнения, т. е. движение дислокаций должно испытывать почти постоянное сопротивление. Как показывает обзор современных теорий деформационного упрочнения металлов, этому предшествует образование сложной 3-мерной сетки дислокаций, в результате чего коэффициент упрочнения резко уменьшается, что может быть связано с так называемым динамическим возвратом, т. е. с разупрочнением.

Увеличение плотности дислокаций приводит к возрастанию микротвердости металла за линией среза по сравнению с исходной более чем в 2,6 раза. Такая высокая степень деформации обычно не обнаруживается при других видах пластической деформации металлов.

Таким образом, после того как достигается критическая степень деформации металла (в данных условиях резания) за линией среза, дальнейшее возрастание степени деформации и плотности дислокаций приводит к значительному снижению температуры отдыха и рекристаллизации сильно деформированного металла. В таких условиях создаются реальные предпосылки для протекания процесса деформационного и динамического разупрочнения. В результате определенная область металла поверхностного слоя, включая выступы и впадины гребешков, в некоторой степени разупрочняется. Необходимость достижения температуры до температуры отдыха и рекристаллизации важна даже для нормального протекания явления динамического разупрочнения. Как по-

показано в работе [25], при этом для поперечного скольжения в железе требуется значительное повышение температуры.

Не должно вызывать сомнения то обстоятельство, что при подаче $1,25 \text{ мм/дв. ход}$ плотность дислокаций не достигает предельного значения от 10^{12} см^{-2} до 10^{13} см^{-2} , обычно принятого в литературе [26].

Дело в том, что здесь, как нам кажется, нельзя не учитывать влияния схемы деформации. Упрочнение выступа гребешка происходит в очень сложных условиях пластической деформации. Будущий выступ находится на поверхности резания, которая заранее, при первом проходе резца, уже сильно упрочнена. При следующем проходе резца с определенной подачей часть поверхности резания срезается вспомогательной режущей кромкой. При этом выступ гребешка формируется после того как затупит раз вспомогательной режущей кромкой пластически деформируется оставшаяся часть поверхности резания, на которой находится выступ. В сложных условиях формируется также впадина гребешка.

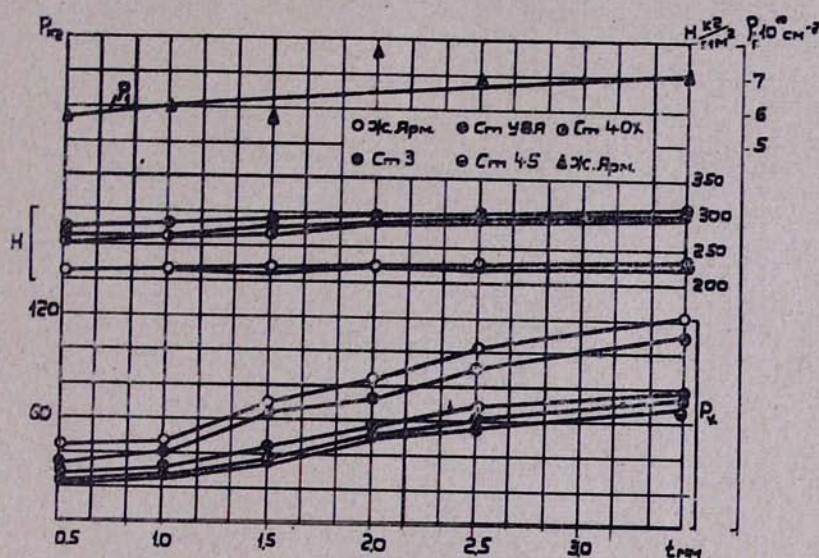


Рис. 4. Зависимость осевой силы P_z , микротвердости и плотности дислокаций (H , ρ_1) от глубины резания (строгание, $V = 8 \text{ м/мин}$, $S = 0,25 \text{ мм/дв. ход}$).

Таким образом, часть металла, образующая гребешок, находится в очень сложном напряженном и деформированном состоянии. Поэтому возможно, что насыщение упрочнения достигается при значении плотности дислокаций, равном $10,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Обнаруженное снижение микротвердости при обработке сталей 45, 40Х и У8А, как показывают кривые на рис. 3, выявляется при значении подачи, равной $1,25 \text{ мм/дв. ход}$, т. е. раньше, чем наблюдается для железа Армко и стали СТЗ. По-видимому, это объясняется меньшей склонностью к упрочнению указанных сталей, вследствие их относительно высокой твердости и меньшего значения величины относительного удлинения по сравнению с железом и сталью СТЗ.

Характер изменения микротвердости и плотности дислокаций изучен также в зависимости от глубины резания. Ее значения при строгании изменялись в пределах от 0,5 до 3,5 мм. На рис. 4 приведены кривые изменения силы P_x , микротвердости и плотности дислокаций металла за линией среза.

Интересно отметить, что как при изменении подачи, так и глубины резания, согласно анализу данных исследований, наблюдается линейный характер изменения микротвердости обработанной поверхности в зависимости от плотности дислокаций.

§ 3. Связь упрочнения поверхности со скоростью резания

Результаты исследований, показывающие характер изменения осевой силы P_x , микротвердости и плотности дислокаций обработанной поверхности, а также микротвердости прирезового слоя стружки, в зависимости от скорости резания, приведены на рис. 5 (опыты проводились при строгании).

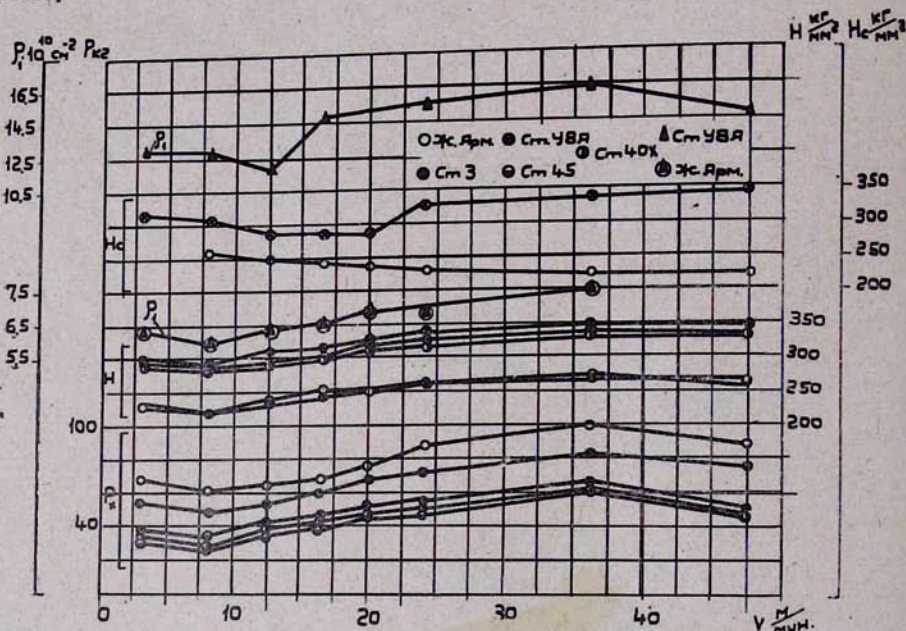


Рис. 5. Зависимость осевой силы P_x , микротвердости поверхности и прирезового слоя стружки (H , H_c) и плотности дислокаций поверхности ρ_1 от скорости резания (строгание, $S = 0,5$ мм/дв. ход, $t = 1,0$ мм),

Исследованы также тангенциальная и радиальная силы резания, усадка стружки и глубина упрочнения поверхности (данные опытов здесь не приведены). Наблюдается, с одной стороны, идентичный характер изменения составляющих силы резания и характеристик упрочнения поверхности, а с другой — усадки стружки и микротвердости прирезового слоя стружки.

В диссертации Г. А. Арутюняна [27], а также частично в [28], установлена физическая сущность неидентичного характера изменения усадки стружки и силы резания. Значительный интерес представляет также изменение средней величины микротвердости прирезцового слоя стружки. С этой целью исследована микротвердость поперечных сечений стружек, при различных скоростях резания. Ниже, на рис. 6, приведены кривые зависимости «микротвердость — расстояние от прирезцовой стороны стружки».

Анализ приведенных данных показывает, что снижение микротвердости прирезцовых сторон стружек нельзя объяснить разупрочняющим эффектом выделяемой теплоты.

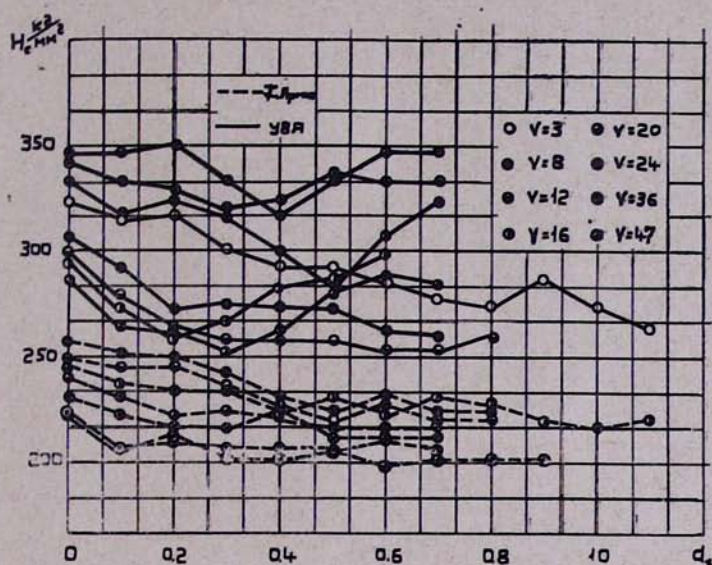


Рис. 6. Зависимость «микротвердость—расстояние от прирезцовой стороны стружки» (по поперечному сечению стружки) при различных скоростях резания (строгание, $S = 0,5$ мм/дв. ход, $t = 1,0$ мм).

При изменении скорости резания от 3 до примерно 20 м/мин, согласно исследованиям Н. Н. Зорева [23], температура резания на передней поверхности резца (условия резания почти идентичны с принятыми нами условиями) достигает значений, приводящих к возрастанию среднего коэффициента трения $\mu_{ср}$ и, следовательно, усадки стружки. Естественно, что в таком случае надо ожидать не уменьшения, а увеличения микротвердости прирезцового слоя стружки. Следовательно, наблюдаемое снижение микротвердости прирезцового слоя стружки можно объяснить непосредственным влиянием скорости деформации сдвига в зоне стружкообразования. Ее значения подсчитаны по зависимости, предложенной Оксли [29]:

$$C_{сдв.} = \frac{16,65 V \cos \gamma}{\Delta S_1 \cos (\beta - \gamma)} \quad (8)$$

При этом заранее определяется ширина зоны стружкообразования ΔS_1 :

$$\Delta S_1 = \frac{\Delta K \cdot a}{(\sigma_A - \sigma_B) \sin \beta} \quad (9)$$

Изменение предела текучести на сдвиг при переходе от начальной к конечной границе зоны стружкообразования ΔK и гидростатические напряжения в соответствующих точках зоны определяются приведенными в [29] формулами. Угол сдвига β определяется по известной зависимости Тиме:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \quad (10)$$

Расчеты показали, что величина $C_{\text{сдв}}$ при увеличении скорости резания от 3 до 36 м/мин при обработке ж. Армоко возрастает примерно в 25 раз (от 6 до 147¹/сек), а при обработке стали У8А — в 40 раз (от 35 до 1536¹/сек).

Таким образом, столь высокие значения скорости деформации должны нейтрализовать противоположное влияние $\mu_{\text{ср}}$ на передней поверхности резца. При дальнейшем увеличении скорости резания до 47 м/мин средний коэффициент трения $\mu_{\text{ср}}$ должен уменьшаться, вследствие чего снижение микротвердости прирезцового слоя стружки (ж. Армоко) при сравнительно больших скоростях резания происходит с одновременным воздействием величины $\mu_{\text{ср}}$ и скорости деформации сдвига.

Следует отметить, что возрастание плотности дислокаций по мере увеличения скорости резания от 3 до 47 м/мин приводит к соответственному росту микротвердости поверхности.

Помимо строгания, проводились опыты и при точении, при больших скоростях резания. Исследованию подвергались металлы, сильно отличающиеся процентным содержанием углерода (ж. Армоко, сталь У8А).

Как показывают данные исследований (рис. 7), при обработке ж. Армоко как сила P_x , так и микротвердость и плотность дислокаций обработанной поверхности, а также микротвердость прирезцового слоя стружки постепенно уменьшаются. Характер изменения сил P_z , P_y , усадки стружки и глубины упрочнения поверхности не отличаются от характера изменения вышеуказанных параметров, в зависимости от скорости резания (данные здесь не приведены).

Наряду с изучением микротвердости прирезцового слоя стружек, исследована и закономерность распределения микротвердости на поперечных сечениях стружек, начиная от прирезцовой до свободной стороны по середине их ширины. Результаты этих исследований, показывающие кривые зависимости «микротвердость—расстояние от прирезцовой стороны стружки», приведены на рис. 8.

Обобщение результатов исследований показывает, что явления, происходящие в зоне стружкообразования и на контактных поверхностях

железа при увеличении скорости резания, оказывают основное воздействие на упрочнение металла в предрезцово-й и подрезцово-й зонах.

Исследованиями различных авторов установлено, что, начиная со скорости $V=35-40$ м/мин, при обработке железоуглеродистых сплавов,

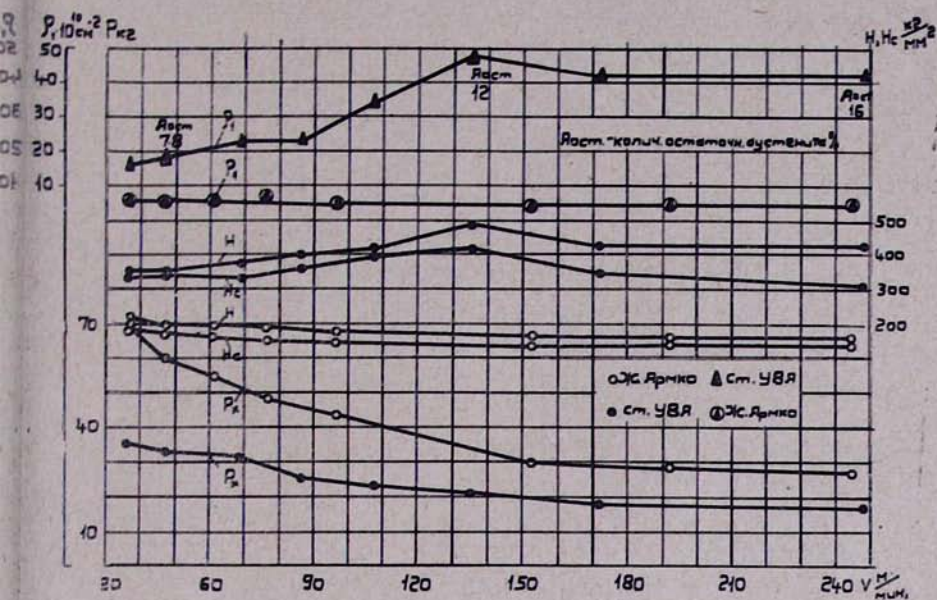


Рис. 7. Зависимость осевой силы P_x , микротвердости поверхности и прирезцового слоя стружки (H , H_c), плотности дислокаций поверхности p_1 и количества образованного в поверхностном слое остаточного аустенита $A_{ост.}$ (%) от скорости резания (точение, $S = 0,52$ мм/об, $t = 1,0$ мм).

коэффициент трения на передней поверхности $\mu_{ср}$ уменьшается. Однако увеличение скорости резания приводит также к увеличению скорости деформации в зоне стружкообразования. Как сказано выше, уже при скорости $V=36$ м/мин скорость деформации сдвига достигает величин 1536¹/сек для стали У8А и 147¹/сек для ж. Армо. Следует ожидать, что с увеличением скорости резания от 36 м/мин скорость деформации еще больше увеличивается, что видно из вышеприведенной формулы по определению $S_{сдв.}$.

Таким образом, уменьшение величины $\mu_{ср}$ и увеличение скорости деформации при увеличении скорости резания, начиная с $V=36$ м/мин, приводит к возрастанию усредненного угла сдвига β . При этом, естественно, степень упрочнения металла в предрезцово-й и подрезцово-й зонах в значительной степени уменьшается. С другой стороны, помимо того, что с увеличением скорости деформации уменьшается объем зоны пластически деформированного металла за линией среза, повышается также температура поверхностных слоев, способствующая разупрочнению металла. Однако увеличение скорости деформации одновременно уменьшает продолжительность воздействия температуры на поверхностный

слой, сокращает время разупрочнения, что ведет к повышению степени упрочнения. По-видимому, взаимодействием указанных факторов и следует объяснить небольшое уменьшение характеристик упрочнения поверхности и стружки для ж. Армко при последних значениях применяемого диапазона скорости резания.

Косвенным доказательством того, что увеличение скорости пластической деформации даже в прирезцовой зоне стружки уменьшает продолжительность воздействия температуры на прирезцовые слои стружки, является характер кривых, приведенных на рис. 8.

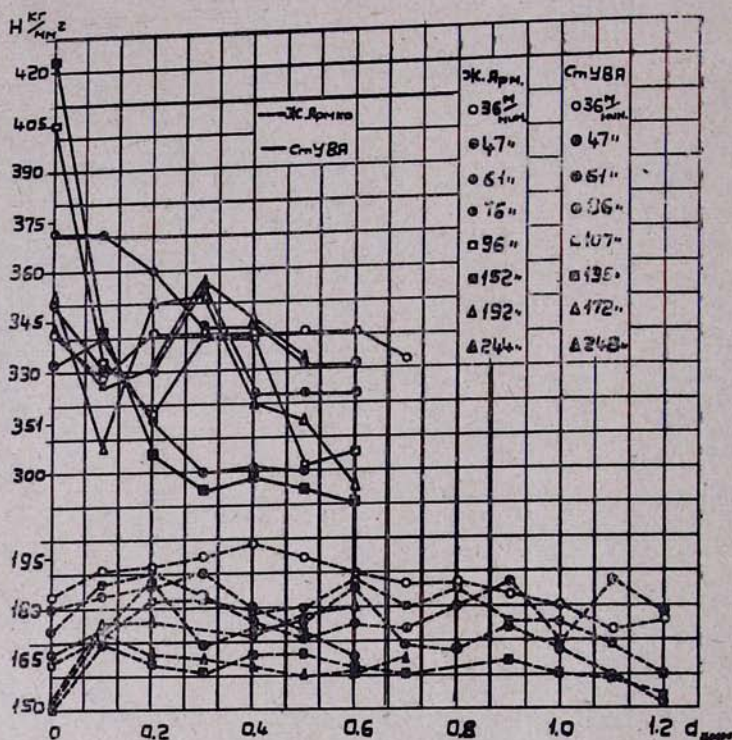


Рис. 8. Зависимость „микротвердость—расстояние от прирезцовой стороны стружки“ (по поперечному сечению стружки) при различных скоростях резания (точение, $S = 0,52$ мм/об, $t = 1,0$ мм).

Как видно, с увеличением скорости резания от 36 до 244 м/мин (ж. Армко) среднее значение микротвердости прирезцового слоя стружки уменьшается, причем наблюдается также снижение микротвердости в определенной зоне, на некотором расстоянии от передней поверхности резца, по поперечному сечению стружки. Здесь важно отметить, что увеличение скорости приводит к уменьшению указанной разупрочненной зоны в прирезцовом слое стружки, особенно при больших скоростях резания. В последних значениях скорости эта зона не превышает 0,1 мм от прирезцовой стороны стружки.

Из изложенного можно заключить, что при увеличении скорости резания скорость деформации в прирезцовом слое стружки принимает такое высокое значение, что выделяемая температура не успевает снимать упрочнение на большом расстоянии от прирезцового слоя стружки.

Данные на рис. 7 показывают, что с увеличением скорости резания среднее значение микротвердости прирезцового слоя стружки уменьшается примерно в такой же закономерности, как и значение микротвердости обработанной поверхности. Это говорит о том, что существует связь между степенью деформации прирезцового слоя стружки и степенью деформации поверхности. Существование такой связи ранее было установлено М. В. Касьяном [4, 5], а также А. И. Исаевым [3], на базе металлографического анализа зоны резания. Наличие корреляционной связи между указанными величинами показывают также количественные данные исследования Г. К. Маркаряна [14].

Изложенное говорит о том, что изменение степени наклепа прирезцового слоя стружки и обработанной поверхности при изменении скорости резания вызывается одной и той же причиной, о которой будет сказано ниже.

Результаты исследований показывают, что с изменением скорости резания существует почти пропорциональная зависимость между усадкой стружки и глубиной упрочнения обработанной поверхности (железо-Армко). С другой стороны, как установлено рядом исследователей, усадка стружки почти не зависит от процессов, происходящих на задней поверхности резца. Из этого следует, что глубина упрочнения поверхности при изменении скорости резания в основном зависит от процессов, происходящих в зоне стружкообразования, перед передней поверхностью резца.

Резюмируя вышесказанное, можно установить, что при изменении скорости резания изменение глубины упрочнения поверхности в основном связано с изменением зоны стружкообразования, охватывающей также некоторую область за линией среза, а степень упрочнения поверхности и стружки — с изменением условий контакта на задней и передней поверхностях резца.

При значениях скорости резания, приводящих к образованию и исчезновению нароста на режущих поверхностях резца, предложенный выше механизм деформационного упрочнения металла в предрезцовой и подрезцовой зонах, в зависимости от скорости резания, не меняется.

§ 4. Особенности упрочнения высокоуглеродистой стали У8А в зависимости от скорости резания

Приведенные на рис. 7 зависимости показывают, что при обработке стали У8А увеличение скорости резания приводит к горбообразному изменению как микротвердости и плотности дислокаций обработанной поверхности, так и микротвердости прирезцового слоя стружки. При этом глубина упрочнения поверхности, подобно изменению усадки стружки и

составляющих силы резания, непрерывно уменьшается. Такая же картина изменения отмеченных данных исследования в зависимости от скорости наблюдается и при других постоянных значениях параметров, характеризующих сечение среза (данные здесь не приводятся).

Таким образом, несмотря на то, что с увеличением скорости резания силы резания уменьшаются, наблюдается интенсивное повышение плотности дислокаций и микротвердости поверхности и прирезцового слоя стружки до определенных значений применяемого диапазона скорости резания. Такое интенсивное повышение плотности дислокаций и микротвердости является не следствием пластической деформации (в этом случае следовало бы ожидать не повышения указанных величин, а, наоборот, снижения), а результатом фазовых превращений металла. Однако эти превращения протекают в специфических для процесса резания условиях. Ряд исследователей считает [30 и др.], что при больших скоростях резания, вследствие чрезвычайно малой продолжительности нагрева, контактные слои металла не претерпевают структурных превращений.

С другой стороны, как показано в работах [31, 32, 14, 33, 34], при обработке конструкционных, углеродистых сырых металлов, а также закаленных сталей, упрочнение поверхностных слоев вызывается не только пластической деформацией, но и вследствие структурного и фазового превращения. В частности, как показано металлографическими исследованиями Т. Н. Лоладзе [33], в ряде случаев успевают происходить структурные превращения в прирезцовых слоях стружки. Автор это объясняет высоким значением температуры контактных слоев металла при больших скоростях резания и уменьшением времени превращения феррита в аустенит. Последнее является результатом значительных пластических деформаций, развиваемых в зоне резания, так как пластическая деформация ускоряет превращение феррита в аустенит. Наши опыты также показали, что с увеличением скорости резания от 36 до 248 м/мин в обработанной поверхности (сталь У8А) образуется аустенит, ярким свидетельством которого является определенное по методу гомологических пар [21] количество остаточного аустенита $A_{ост}$ в %. Как видно из данных, приведенных на рис. 7, при скорости резания 48 м/мин количество $A_{ост}$ в поверхностном слое составляет 7,8%, а при скорости, равной 135 м/мин — 12%. Наибольшее количество остаточного аустенита образуется при предельной скорости ($V=248$ м/мин)—16%.

Таким образом, из наших исследований также следует, что структурные превращения, происходящие даже в обработанной поверхности при определенных условиях резания, не вызывают сомнения.

Обобщая вышесказанное, можно дать следующий механизм упрочнения поверхностных слоев детали и стружки при обработке стали У8А, в зависимости от скорости резания.

С увеличением скорости резания, включая низкие значения скорости, до значений $V=110-130$ м/мин (в зависимости от применяемой величины подачи) температура контакта резца с обрабатываемым метал-

лом непрерывно увеличивается. Одновременно с этим сильно возрастают нормальные удельные силы (давление) на соответствующих поверхностях реза. Совокупное влияние указанных факторов в большей степени облегчает процесс превращения исходной структуры в аустенит.

Помимо указанных явлений, значительно улучшаются условия охлаждения контактных слоев. С другой стороны, как это вытекает из экспериментов В. И. Просвирина [35], в местах сдвигов и разрыхления решетки внутренние напряжения ускоряют перестройку нестабильной решетки аустенита в решетку мартенсита. Следовательно, в результате одновременного протекания вышеуказанных факторов происходит частичный распад образованного в предрезцовой и подрезцовой зонах аустенита с образованием соответствующих структур. При этом распад аустенита при низких значениях скорости резания сопровождается появлением структур неполной закалки (сорбит, троостит), а при больших скоростях резания ($V=107-135$ м/мин) — образованием структуры закаленного металла (троостит, мартенсит). Ярким свидетельством последнего являются высокие значения плотности дислокаций и микротвердости ($\rho_1 = 35-48 \cdot 10^{10}$ см⁻² и $H = 423-498$ кг/мм², т. е. $R_C = 46-50$).

Дальнейшее увеличение скорости до $V=250-272$ м/мин приводит к интенсивному росту температуры контакта, некоторому увеличению удельных нормальных сил и значительному улучшению условий охлаждения контактных поверхностей. Одновременно с указанными явлениями в значительной степени возрастает скорость деформации на соответствующих поверхностях реза.

Наблюдаемое некоторое снижение величин исследуемых параметров в указанном диапазоне увеличения скорости резания объясняется снижением времени распада образованного аустенита, вследствие высоких значений скорости деформации металла на поверхностных слоях деформируемого материала.

Отметим, что образование структуры закаленного металла в обработанной поверхности при обработке стали У8А ранее было установлено в [36]. Следовательно, взаимодействие вышеуказанных противоположных факторов в конечном счете предопределяет наблюдаемое значение микротвердости и плотности дислокаций поверхности и прирезцового слоя стружки.

Важно отметить, что фазовые превращения, как следует из данных наших экспериментов (рис. 8), охватывают в основном небольшие слои исследуемых поверхностей (толщиной 10—15 мк). Сказанное говорит о том, что упрочнение нижележащих слоев поверхностей является результатом пластической деформации. К подобному заключению ранее пришел Г. К. Маркарян [36].

§ 5. О связи микротвердости с плотностью дислокаций обработанной поверхности

Как сказано выше, микротвердость и плотность дислокаций обработанной поверхности изучены в зависимости от режимов резания и свойств обрабатываемого металла. Исследованию подвергались железо Армо и сталь У8А.

Следует отметить, что принятая нами методика по определению плотности дислокаций поверхности исходит из предположения, что дислокации внутри блоков (субзерен) не образуются. Такое предположение подтверждается данными электронномикроскопических исследований.

Согласно [26], непосредственное наблюдение на просвет в электронном микроскопе тонких пленок обнаруживает четко сформулированную мозаичную структуру с накоплениями дислокаций только между блоками. Исходя из этого, по-видимому, можно считать правильным предположение М. К. Смита [37] о том, что мозаичная, блочная структура в металле возникает вследствие наличия дислокаций. Таким образом, определение плотности дислокаций по методике, предложенной в § 1, в качественном отношении имеет вполне реальную основу.

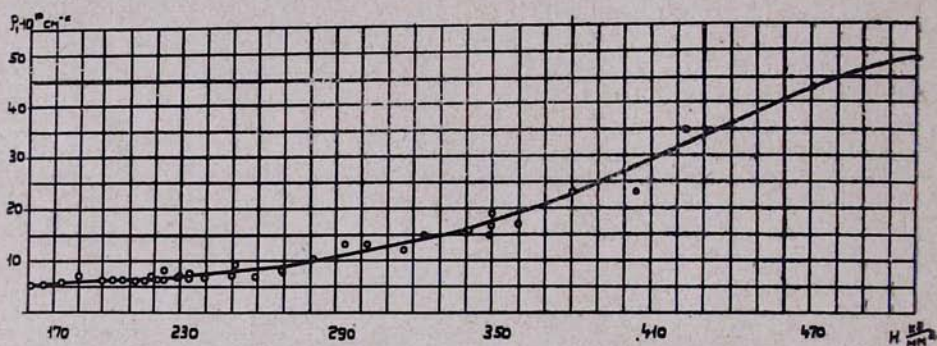


Рис. 9. Зависимость «микротвердость—плотность дислокаций обработанной поверхности».

На базе полученных экспериментальных данных нами построена общая зависимость «микротвердость—плотность дислокаций» при изменении условий резания в широких пределах. Из представленных данных следует, что при широком диапазоне изменения микротвердости и плотности дислокаций линейной связи между ними не наблюдается (рис. 9).

С другой стороны, совершенно ясно, что указанная кривая в некоторой степени подтверждает существующие в литературе по физике металлов основные положения относительно механизма упрочнения металлов.

Согласно [25], существуют три стадии пластического деформирования металлов: стадия легкого скольжения, стадия линейного упрочнения и, наконец, стадия параболического упрочнения.

По-видимому, предлагаемая нами форма кривой $H_n - \epsilon_1$ отражает последние стадии процесса упрочнения по схеме, данной выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Е. Дьяченко, Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки, Изд. АН СССР, 1949.
2. П. Е. Дьяченко, М. О. Якобсон, Качество поверхности при обработке металлов резанием, Машгиз, 1951.
3. А. И. Исаев, Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием, Машгиз, 1950.
4. М. В. Касьян, Некоторые особенности качества поверхности при скоростном точении, Качество поверхностей деталей машин, часть 2, кн. 16, Машгиз, 1950.
5. М. В. Касьян, Некоторые вопросы образования поверхностного слоя, Качество поверхностей деталей машин, сб. 4. Изд. АН СССР, 1959.
6. М. О. Якобсон, Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке, Машгиз, 1956.
7. А. В. Подзей, Остаточные напряжения при шлифовании и их регулирование, сб.: «Высокопроизводительное шлифование», Изд. АН СССР, 1962.
8. Н. Н. Рыкалин, А. В. Подзей и др., Исследование методом теплового моделирования остаточных напряжений в металле после обработки резанием, Труды Московского авиационного института, вып. 173, 1967.
9. А. А. Маталин, Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин, Машгиз, 1956.
10. И. С. Штейнберг, Влияние режимов резания, геометрии резца и состояния обрабатываемого металла на качество обработанной поверхности, Качество поверхностей деталей машин, часть 2, кн. 16, Машгиз, 1950.
11. И. С. Штейнберг, Влияние режимов резания и геометрии резца на качество поверхностного слоя сталей, обработанных точением и скоростным фрезерованием. Скоростные методы обработки металлов, Машгиз, 1949.
12. Л. Г. Ку克林, Зависимость состояния поверхностного слоя и износостойкости стальных деталей от условий резания, диссертация, Свердловск, 1955.
13. Д. Д. Папшев, Качество поверхности и усталостная прочность, «Вестник машиностроения», № 10, 1954.
14. М. В. Касьян, Г. К. Маркарян, Высокое качество поверхности (упрочнение) — основа повышения надежности, Ереван, 1966.
15. А. Алыбаков, Ю. С. Терминасов, Рентгенографический метод определения плотности дислокаций в поверхностном слое детали, обработанной точением, Изв. АН Киргизской ССР, сер. естественных и технических наук, т. I, вып. 3, 1959.
16. А. Г. Баитов, Исследование состояния поверхностного слоя металла, обработанного фрезами из минералокерамики УМ 332, «Станки и инструмент», № 1, 1967.
17. А. Г. Баитов, Влияние материала инструмента на состояние обработанной поверхности, «Станки и инструмент», № 4, 1968.
18. Я. С. Уманский, Рентгенография металлов. Металлургиздат, 1960.
19. Л. И. Миркин, Я. С. Уманский, Исследование состояния кристаллической решетки и плотности дислокаций при фазовых превращениях в сталях, «Физика металлов и металловедение», т. 9, вып. 6, 1960.
20. Л. И. Миркин, Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов, Физматгиз, 1961.
21. Н. Н. Качанов и др., Методика определения количества остаточного аустенита в подшипниковых сталях, Труды ВНИПП, № 1, 1963.

22. М. В. Касьян, Г. А. Арутюнян, К вопросу об упрочнении поверхностного слоя в функции от параметров среза, Физика резания металлов, вып. 1, Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1971.
23. Н. Н. Зорев, Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, 1956.
24. Ю. С. Шарин, Об усадке стружки при изменении подачи и глубины резания в широких пределах, Труды Уральского политехнического института, сб. 50, 1956.
25. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов, под. ред. В. С. Иванова, М., «Наука», 1965.
26. В. И. Трефилов, Пластическая деформация и разрушение металлов, Физические основы прочности и пластичности металлов. Metallurgizdat, 1963.
27. Г. А. Арутюнян, Влияние условий стружкообразования на дислокационное упрочнение поверхности, кандидатская диссертация, Ереван, 1969.
28. М. В. Касьян, Г. А. Арутюнян, Г. Б. Багдасарян, О связи силы удара с характером изменения сил резания при строгании, Изв. АН Арм. ССР, серия технических наук, № 1, 1970.
29. Оксли, Скорость деформации при резании металла, Труды Американского общества инженеров-механиков, сер. В, т. 85, № 4, 1963.
30. Э. И. Фельдштейн, К вопросу о сущности скоростного резания сталей. «Станки и инструменты», № 12, 1950.
31. С. Е. Нестеровский, Экспериментальное исследование качества поверхности конструкционной стали, обработанной скоростным резанием, и долговечность деталей машин, автореферат диссертации, Киев, 1953.
32. Н. С. Штейнберг, Использование скоростного резания металлов для повышения усталостной прочности деталей машин, Повышение долговечности машин, Машгиз, 1956.
33. Т. Н. Лоладзе, Износ режущего инструмента, Машгиз, 1958.
34. А. Я. Малкин, Скоростное точение закаленных сталей, Скоростная обработка металлов резанием. Оборонгиз, 1951.
35. В. А. Просви́рин, Влияние внешнего давления на фазовые превращения в стали и чугу́не, Машгиз, 1948.
36. Г. К. Маркарян, Упрочнение поверхности и его связь со стружкообразованием. Качество поверхности деталей машин, сб. 5, Изд. АН СССР, 1961.
37. М. К. Смит, Основы физики металлов, Metallurgizdat, 1962