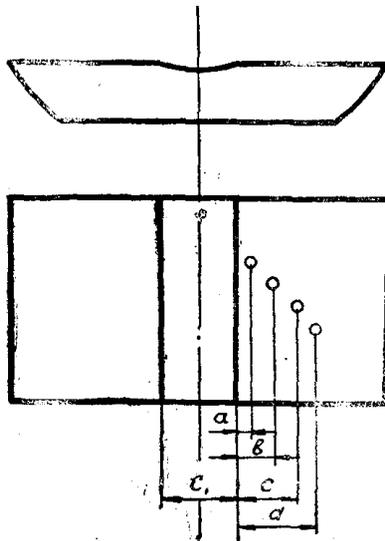
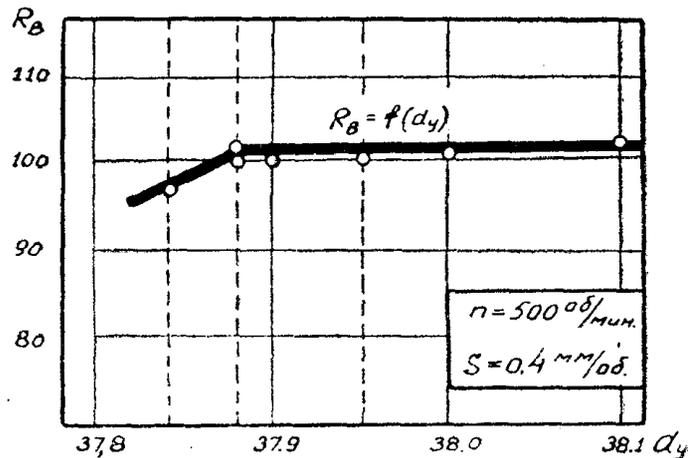


3) первоначальной твердости стали; 4) усилий, возникающих на шариках оправки.

Первая серия опытов состояла в установлении зависимости поверхностной твердости от диаметра установки шариков оправки (d_y). Опыты проводились над сталью 45, имеющей твердость по Бринелю 197. Диаметр отверстия практически оставался постоянным. Меняя d_y , мы тем самым меняли толщину деформированного слоя, а следовательно, и величину



Фиг. 1. Образец для определения поверхностной твердости и глубины проникновения наклепа



Фиг. 2. Влияние диаметра установки оправки на поверхностную твердость после накатки

усилий, возникающих на шариках. Установлено, что твердость поверхностного слоя не остается постоянной с изменением толщины деформируемого слоя. Результаты этих исследований приведены в табл. 1 и фиг. 2.

Таблица 1

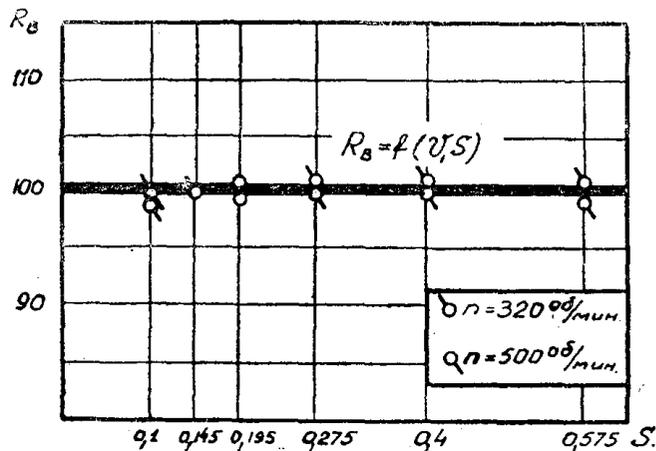
Влияние диаметра установки оправки на поверхностную твердость после накатки (n и s —постоянны)

Диаметр установки (d_y)	Диаметр отверстия до накатки	Твердость поверхн. слоя				ПРИМЕЧАНИЕ
		по Бринелю		по Роквеллу		
		до накатки	после накатки	до накатки	после накатки	
38,1	37,72	197	249	90	102	Следы шелушения
38,0	37,72	197	244	91	100,5	Чистая
37,95	37,72	197	241	90	100,0	Чистая блестящая
37,9	37,72	197	241	90	100,0	"
37,88	37,72	197	246	90	101,0	"
37,88	37,72	197	241	91	100,0	"
37,84	37,72	197	222	90	97,0	Чистая, следы предварит. обработки

Из приведенной таблицы видно, что величина поверхностной твердости возрастает с увеличением диаметра установки и усилия деформации (увеличение диаметра установки аналогично увеличению давления на обрабатываемую поверхность). Здесь же видно, что это возрастание твердости поверхностного слоя наблюдается только до определенного предела. После этого

предела возрастания поверхностной твердости не происходит, а наблюдается (как мы увидим ниже) увеличение глубины проникновения деформации. Значительное увеличение степени деформации сопровождается разрушением поверхностного слоя—„шелушением“.

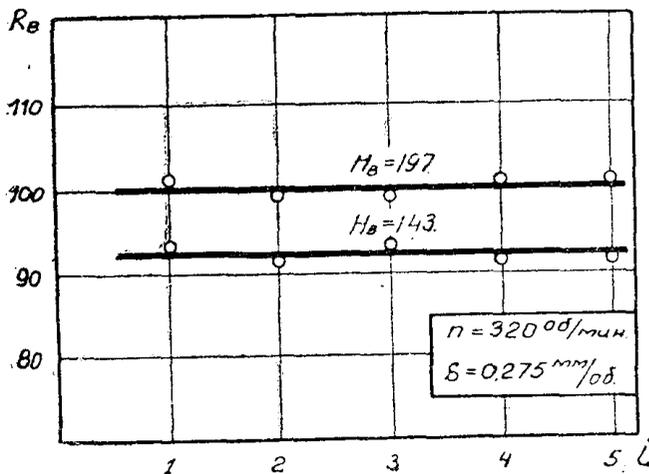
Подобные явления достижения предельной твердости металлом, получающем наклеп, наблюдались также Г. О. Нейманом и Мозером. В наших исследованиях установлено, что пределом возрастания твердости поверхностного слоя является диаметр 37,88 мм. Этот диаметр установки оправки нами принят как оптимальный, так как деформация при большем его значении не дала увеличения поверхностной твердости. Именно этот диаметр установки нами принят как оптимальный еще и потому, что меньшие зна-



Фиг. 3. Влияние скорости и подачи при накатке на величину поверхностной твердости после накатки

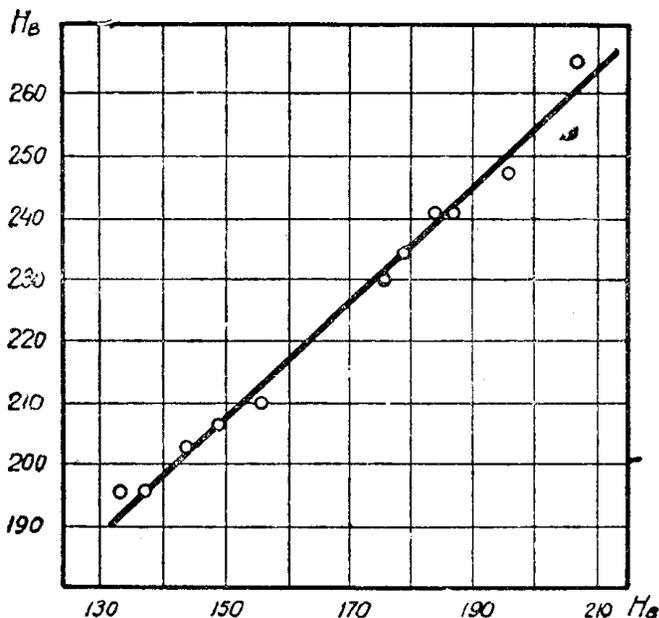
чения его оставляя следы предшествовавшей обработки, не имеют практического значения. Диаметр установки 37,88 мм или разность диаметров накатки и отверстия до накатки 0,16 мм взяты нами при исследованиях влияния скорости, подачи и первоначальной твердости материала. При этом после проведения основных опытов с диаметром 37,88 мм были проведены проверочные опыты на других диаметрах, изменяющихся до 85 мм с сохранением постоянной разности диаметров (0,16 мм), которые полностью подтвердили правильность сделанных выводов.

Из фиг. 3 и 4 видно, что влияние скорости, подачи и числа проходов по слою на поверхностную твердость отсутствует.



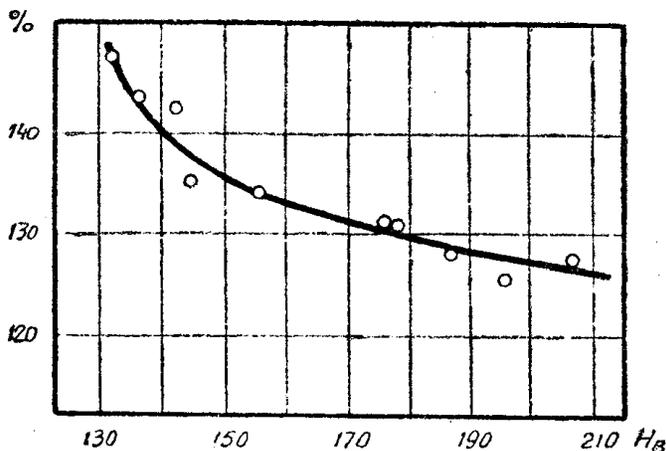
Фиг. 4. Влияние числа проходов по слою на величину поверхностной твердости после накатки

На фиг. 5 и 6 дано изменение поверхностной твердости в зависимости от первоначальной твердости стали. Фиг. 5 дает абсолютные значения этой твердости, а на фиг. 6 показано относительное ее возрастание при меняющейся первоначальной твердости материала. Из последнего графика (фиг. 6) видно, что с увеличением твердости стали относительное увеличение поверхностной твердости при накатке уменьшается. В среднем она для углероди-



Фиг. 5. Изменение поверхностной твердости после накатки с изменением первоначальной твердости стали

стых конструкционных сталей лежит в пределах 28—48%. Это обстоятельство чрезвычайно важно, так как дает возможность, используя накатку поверхности, получать износоустойчивость малоуглеродистой стали, равную высокоуглеродистой, износоустойчивость в сильной степени зависит от твердости материала.



Фиг. 5. Относительное изменение поверхностной твердости после накатки

Глубина наклепа и режим накатки

Нашими исследованиями, а также исследованиями других авторов установлено, что наклеп, полученный на поверхности изделия путем воздействия

на нее некоторых усилий, распространяется от периферии вглубь металла. При этом установлено, что твердость наклепанного слоя изменяется от максимального ее значения на поверхности до нормальной твердости недеформированного металла. Следовательно, в наклепанном слое имеет место плавное изменение твердости, а значит и степени деформации. Нами была поставлена задача выявления глубины проникновения деформации в зависимости от ряда факторов.

Выявление закономерности изменения глубины проникновения наклепа представляет значительный научный и практический интерес, так как данный вопрос в достаточной степени не изучен.

Мы считали, что накатка может и должна стать одним из методов чистой обработки отверстий, а для этого необходимо знать, какие факторы влияют на глубину проникновения наклепа. В ряде случаев по конструкции детали упрочнение поверхности наклепом не может быть осуществлено последней операцией обработки данной поверхности, и тогда необходимо будет подвергнуть эту поверхность после накатки дополнительной обработке резанием. В последнем случае особенно важно создать наклеп заранее заданной величины с тем, чтобы в процессе дальнейшей обработки (снятием стружки) не был снят весь наклепанный слой. Наиболее часто такая обработка может потребоваться при ремонте деталей после их некоторого износа. Из сказанного становятся ясными причины, заставившие нас заняться детальным изучением вопроса о глубине проникновения наклепа при накатке отверстий. Необходимость изучения этого вопроса еще усугубляется и тем, что все исследования, имеющиеся в этой области, относятся только к наружным поверхностям.

Для разрешения поставленной задачи необходимо было принять такую методику определения твердости на некоторой глубине образца, которая давала бы нам достаточно точные результаты. Трудность разрешения вопроса состояла в том, что мы имели дело с внутренними поверхностями, спиливание или стравливание которых не исключает возможных ошибок вследствие сложности контроля величины снятого слоя на разрезанном образце. По этой причине мы остановились на методе „косого среза“. Преимущества данного метода перед существующими методами в том, что здесь мы имеем дело с несколько увеличенными расстояниями, благодаря чему относительная точность нашего метода безусловно выше. Вторым преимуществом выбранного нами метода необходимо считать простоту изготовления образцов и измерения твердости на них, а также и расстояний, на которых производились отсчеты твердости.

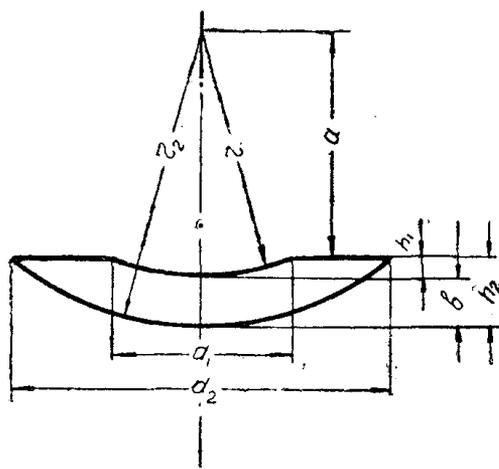
Сущность принятой методики состоит в том, что для целей определения глубины проникновения наклепа образцы разрезались по некоторой хорде таким образом, что оставалась узкая полоска наклепанной внутренней поверхности. Параллельно данному разрезу срезалось основание образца, чем создавалась достаточно надежная опорная поверхность. На полученном таким образом образце (фиг. 1) на некотором произвольном расстоянии от оставленной полоски внутренней накатанной поверхности производились замеры твердости на приборе Роквелла. В результате этих замеров на поверхности оставались отпечатки шарика. Пользуясь микроскопом Бринеля, мы измеряем расстояния от центра отпечатки шарика до края оставленной полоски и самую полоску. Полученные таким путем отсчеты затем пересчитывались на расстояния по радиусу.

Зависимость отсчетов расстояний по хорде и радиусу представлена на фиг. 7 и может быть выражена следующей математической зависимостью:

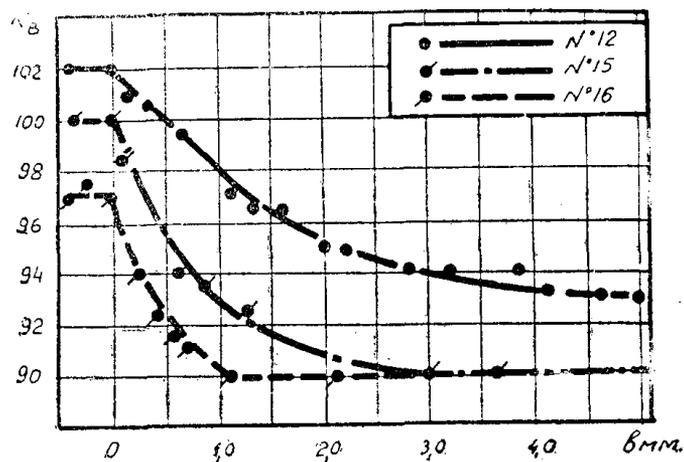
$$b = \frac{1}{2} \sqrt{4(r_1 - h_1)^2 + c_2^2} - r_1. \quad (1)$$

Пользуясь уравнением (1), мы определяли глубину, на которой производилось измерение твердости, отсчитанную по радиусу. На основании полученных расчетов строились кривые изменения твердости в зависимости от глубины (фиг. 8). Из полученных таким образом графиков определялась глубина проникновения наклепа.

За глубину деформации или наклепа принималась глубина, соответствующая точкам перегиба кривых, построенных для каждого образца, с постоянной твердостью основного материала на возрастающую ветвь.



Фиг. 7



Фиг. 8. Определение глубины проникновения наклепа

В результате проведенных исследований получена вполне определенная закономерность постепенного снижения твердости от поверхностного слоя, где она постоянна, до основного материала, также имеющего постоянную твердость. Рассматривая полученные закономерности изменения твердости по толщине накатанного слоя, интересно отметить, что она снижается более плавно с увеличением степени деформации, что видно из графиков фиг. 8, где верхняя кривая соответствует максимальной степени деформации, нижняя — минимальной.

Постепенное снижение твердости отмечено также в работах Хоргера и В. А. Кельдюшева [2], определявших глубину проникновения наклепа постепенным механическим удалением поверхностных слоев.

Явление постепенного снижения твердости наклепанного слоя от максимальной до твердости основного материала является ценным качеством предлагаемого метода обработки, так как наряду с повышенной твердостью поверхностного слоя отсутствует резкая грань в твердостях. Это исключает возможность возникновения перенапряжения в месте перехода наклепа в основной металл и возможное отскакивание наклепанного слоя в процессе работы детали, что имеет место иногда при поверхностной закалке.

Влияние режима накатки на глубину проникновения наклепа

В исследованиях А. М. Розенберга [3], опытах, проведенных на 1 ГПЗ [4], рентгено-структурных исследованиях Томассена и Мак-Кетчена [4] отмечается, что глубина наклепа изменяется с изменением скорости деформации. Увеличение скорости деформации сопровождается уменьшением глубины наклепа.

Данные, целиком подтверждающие правильность выводов приведенных выше исследователей, получены и в наших опытах.

Результаты исследований влияния скорости деформации на глубину проникновения наклепа приведены в табл. 2 и на фиг. 9.

Таблица 2

Влияние скорости деформации на глубину проникновения наклепа

Образец	оборотов/мин.	м/мин.	мин/оборотов	мм	Глубина проникновения наклепа „в“ в мин.
28	500	59,8	0,100	37,88	1,4
29	500	59,8	0,145	37,88	1,2
30	500	59,8	0,195	37,88	1,3
31	500	59,8	0,275	37,88	1,2
32	500	59,8	0,400	37,88	1,1
33	500	59,8	0,575	37,88	1,0
34	320	38,3	0,575	37,88	1,5
35	320	38,3	0,400	37,88	1,75
36	320	38,3	0,275	37,88	1,75
37	320	38,3	0,195	37,88	1,9
38	320	38,3	0,145	37,88	2,25
39	320	38,3	0,100	37,88	2,10

Из таблицы и графика видно, что при изменении подачи от 0,575 мм/об до 0,1 мм/об и числа оборотов от 500 об/мин до 320 об/мин получается изменение глубины проникновения наклепа от 1,0 мм при $n = 500$ об/мин и $s = 0,575$ мм/об—максимальной скорости деформации в данной серии опытов, до 2,25 мм при $n = 320$ об/мин и $s = 0,145$ мм/об.

Как видно из графика фиг. 9, зависимость глубины проникновения наклепа „b“ от скорости и подачи выражается параллельными линиями. Следовательно, она может быть выражена уравнением

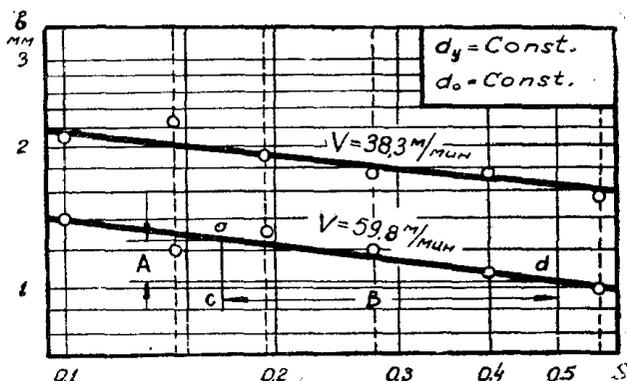
$$b = f(s) \quad (2)$$

или

$$b = \frac{C}{s^x}, \quad (3)$$

где C — постоянная, зависящая от скорости накатки, материала и условий опыта,

x — показатель степени, характеризующий обрабатываемый материал.



Фиг. 9. Влияние скорости деформации на глубину проникновения наклепа

Конкретные значения коэффициента „C“ и показателя степени „x“ могут быть определены из графика фиг. 9.

Определение их значения:

$$\operatorname{tg} \alpha = x = \frac{2A}{B}. \quad (4)$$

Ордината по оси „y“ принята с коэффициентом 2 потому, что на чертеже масштаб значений глубины проникновения наклепа в два раза мельче масштаба подачи

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2,7,0}{60} = 0,233.$$

Коэффициент „C“, выраженный через глубину проникновения наклепа и подачу, может быть определен из следующей зависимости

$$C = bS^x, \quad (5)$$

$$\text{при } v_1 = 59,8 \text{ м/мин, } C_1 = b_1 S^x = 1,4 \cdot 0,1^{0,233} = 0,836,$$

$$v_2 = 38,3 \text{ м/мин, } C_1 = b_2 S^x = 2,1 \cdot 0,1^{0,233} = 1,26.$$

Из полученных значений коэффициента „C“ видим, что он зависит от скорости накатки.

Влияние скорости накатки на глубину проникновения наклепа при постоянной подаче изменяется по закону прямой, для которой может быть написано уравнение:

$$b = A - mv, \quad (6)$$

где A — постоянная, зависящая от условий опыта и обрабатываемого материала,

m — коэффициент при скорости накатки, соответствующий тангенсу угла наклона прямой.

Из данных опытов значения коэффициентов m и A будут

$$m = - \frac{1,4 - 2,1}{59,8 - 38,3} = 0,0325,$$

$$A = b + mv = 2,1 + 0,0325 \cdot 38,3 = 3,345,$$

тогда

$$b = 3,345 - 0,0325 v.$$

Выше указывалось, что линии, соответствующие глубине проникновения наклепа, при различных скоростях параллельны в логарифмических координатах и что значения „C“ являются функцией скорости накатки.

Значения коэффициента „C“ при различных скоростях могут быть определены из уравнения (5), что мы и делаем для $S = 0,1$ мм/об и разных значений скорости. Результаты расчетов сведены в таблице 3.

Таблица 3
Значения коэффициента „C“ при различных скоростях накатки

v м/мин	59,8	38,3	23,9	10,0	6,4
Значения „C“	0,836	1,26	1,5	1,74	1,98

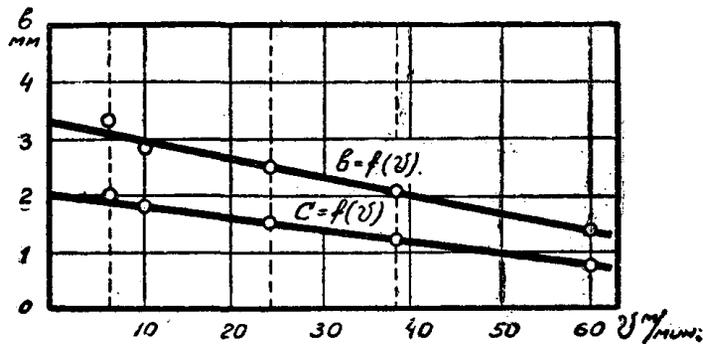
Данные таблицы нанесены на график фиг. 10. Из графика видно, что значения коэффициента „C“ так же, как и глубины проникновения наклепа, выражаются прямолинейной зависимостью, для которой может быть написано уравнение следующего вида

$$C = A_1 - m_1 v.$$

Соответствующие значения A_1 и m_1 будут

$$m_1 = \frac{1,26 - 0,836}{59,8 - 38,3} = 0,197,$$

$$A_1 = C + m_1 v = 1,26 + 0,0197 \cdot 38,3 = 2,015.$$



Фиг. 10. Влияние скорости накатки на глубину проникновения наклепа

Подставив значения „С“ в формулу (3), получим выражение глубины проникновения наклепа в зависимости от скорости и подачи в следующем виде

$$b = \frac{A_1 - m_1 v}{s^x} \quad (8)$$

Для нашего материала уравнение (8) может быть написано так:

$$b = \frac{2,015 - 0,0197 v}{s^{0,233}} \quad (9)$$

Проверим правильность выведенной зависимости

$$b = \frac{2,015 - 0,0197 \cdot 59,8}{0,3^{0,233}} = 1,16,$$

что точно соответствует графику фиг. 9.

Выведенная здесь нами зависимость глубины проникновения наклепа от скорости и подачи справедлива для стали 45.

В работах Хергера, Фоппеля [5] дается взаимосвязь давления деформации и глубины проникновения. Оба они считают, что с увеличением усилия деформации растет глубина проникновения наклепа.

В настоящих исследованиях получено полное соответствие результатов опытов зависимости, высказанной указанными авторами. Нами установлено, что с увеличением разности диаметров оправки и отверстия до обработки, что равносильно увеличению степени деформации, значительно увеличивается глубина проникновения наклепа. Результаты исследований приведены в табл. 4 и выражены графически на фиг. 11.

Из графика и таблицы видно, что глубина проникновения наклепа может значительно меняться в зависимости от толщины деформируемого при накатке слоя. Так, в наших опытах при изменении разности диаметров оправки и обрабатываемого отверстия от 0,12 мм до 0,38 мм, то есть в 3,15 раза, глубина наклепа изменилась с 0,9 мм до 4,5 мм, то есть в 5 раз.

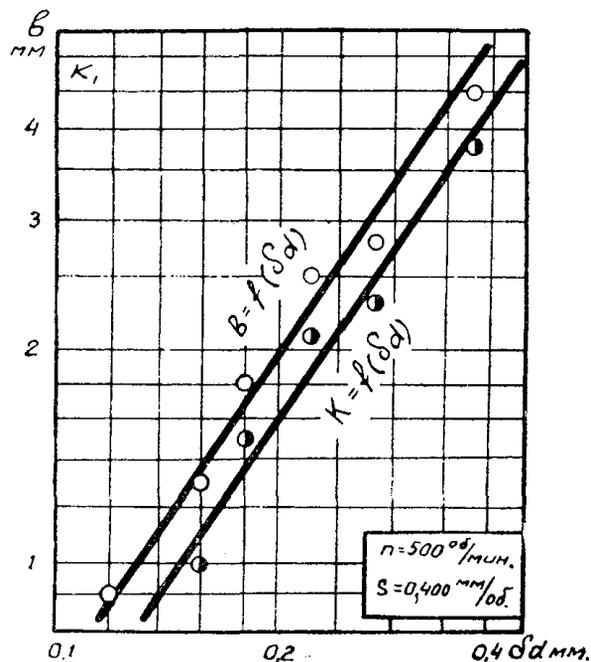
К аналогичным выводам приходит Шмальц [6], который говорит: „Глубина деформированной зоны возрастает строго пропорционально повышению давления резания“.

Таблица 4

Зависимость глубины проникновения наклепа от разности диаметров оправки и отверстия до накатки

Образец <i>N</i>	<i>P</i> оборотов мин	<i>S</i> мм оборотов	$a_y - a_0$	Глубина проникнове- ния наклепа в мм
12	500	0,4	0,38	4,5
14	500	0,4	0,23	2,5
13	500	0,4	0,28	2,7
16	500	0,4	0,12	0,9
15	500	0,4	0,18	1,8
17	500	0,4	0,16	1,3

Из графиков, выражающих зависимость твердости от глубины проникновения наклепа, видим, что помимо изменения глубины проникновения наклепа меняется и характер распределения твердости внутри наклепанного слоя. Твердость, полученная при большей разности диаметров (δd) выше твердости, полученной на этой же глубине при меньшей разности диаметров. Это дает нам право утверждать, что детали, получившие наклеп при большей деформации, будут иметь более высокую механическую прочность не только за счет увеличения толщины наклепанного слоя, но и за счет увеличения твердости на меньшей глубине. Так, например, если взять твердость



Фиг. 11. Зависимость глубины проникновения наклепа от разности диаметров оправки и отверстия до накатки

на глубине 0,5 мм для δd равной 0,12, 0,23 и 0,38, то она соответственно равна 91,5, 97,5 и 99,5 единиц по Роквеллу шкале „В“. Следовательно, при большем усилии деформации увеличивается объем более прочного металла и значительно повышается прочность всего изделия.

Зависимость, представленная на фиг. 11, может быть выражена уравнением

$$b = C_2 \delta d^y. \quad (10)$$

Из графика $y = \operatorname{tg} \alpha = 1,41$, тогда коэффициент C_2 определим, взяв конкретные значения „ b “ и „ δd “ при $b = 2$ мм и $\delta d = 0,21$ мм.

$$C_2 = \frac{b}{\delta d^y} = \frac{2}{0,21^{1,41}} = 18,3.$$

Если принять глубину проникновения наклепа при $\delta d = 0,16$ за единицу, то при других разностях диаметров она может быть выражена коэффициентом K_1 . Значения коэффициента K_1 приведены в табл. 5 и на фиг. 11 (нижняя линия).

Значения коэффициента k_1 .

Таблица 5

Разность диаметров	0,1	0,16	0,18	0,23	0,28	0,38
Значения k_1	0,75	1,0	1,5	2,08	2,25	3,75

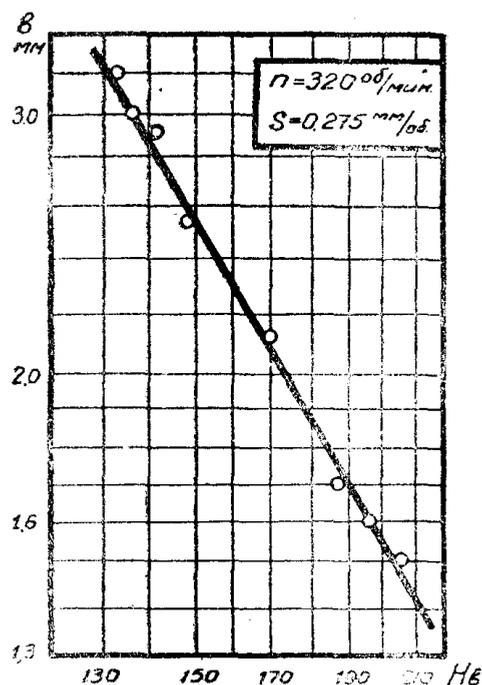
Из фиг. 11 видим, что зависимость K_1 аналогична зависимости „ b “ от разности диаметров, то есть

$$K_1 = C_1^2 \delta d^y. \quad (11)$$

Линии, выражающие $b = f(\delta d)$ и $K_1 = f(\delta d)$, параллельны, следовательно, показатель степени при δd в обоих случаях одинаков

$$C_1^2 = \frac{K}{\delta d^y} = \frac{1,51}{0,2^{1,41}} = 14,6.$$

Далее автор определяет зависимость глубины проникновения наклепа от первоначальной твердости стали. Эксперименты показали, что глубина проникновения наклепа зависит от твердости стали. График фиг. 12 ярко отображает эту зависимость.



Фиг. 12. Зависимость глубины проникновения наклепа от первоначальной твердости стали

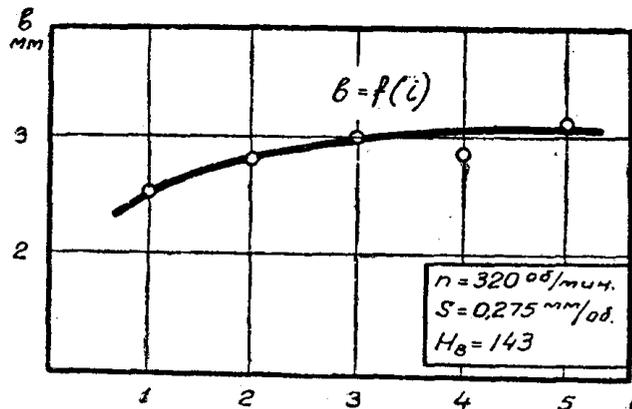
Приняв глубину проникновения наклепа при $H_b = 197$ за единицу, получили следующие значения коэффициента (K_2), учитывающего влияние H_b на глубину проникновения наклепа (табл. 6).

Таблица 6

Значения коэффициента k_2 .

H_8	207	197	170	149	137	134
k_2	0,93	1	1,28	1,56	1,9	2,0

Влияние числа проходов (i) по слою представлено на фиг. 13. Из графика фиг. 13 видно, что с увеличением числа проходов по слою относительное увеличение глубины проникновения наклепа уменьшается.



Фиг. 13. Влияние числа проходов по слою на глубину проникновения наклепа

Значения коэффициента (K_3), учитывающего влияние числа проходов по слою на глубину проникновения наклепа, представлены в таблице 7.

Таблица 7

Значения коэффициента k_3

Число проходов по слою	1	2	3	4	5
k_3	1,00	1,10	1,16	1,20	1,23

Для получения полноты картины зависимости глубины проникновения наклепа от условий накатки были проведены опыты по установлению влияния количества шариков „накатки“. Опыты проводились с 3, 4, 6 и 8 шариками. Результаты опытов, представленные на фиг. 14, показывают, что с увеличением количества шариков оправки глубина проникновения наклепа уменьшается. Некоторое колебание подачи на шарик считаем не существенным, так как оно не превышает 0,006 мм и вызвано невозможностью бесступенчатого регулирования подачи на станке.

В логарифмических координатах зависимость глубины проникновения от количества шариков выражается прямой и может быть представлена уравнением

$$b = C_1 n_{ш}^{-z}, \quad (12)$$

где $n_{ш}$ — количество шариков,

C_1 — коэффициент, зависящий от условий опыта и обрабатываемого материала,

z — показатель степени при $n_{ш}$.

Значение коэффициента (K_4), учитывающего влияние количества шариков оправки на глубину проникновения наклепа, представлены в табл. 8 и на фиг. 14.

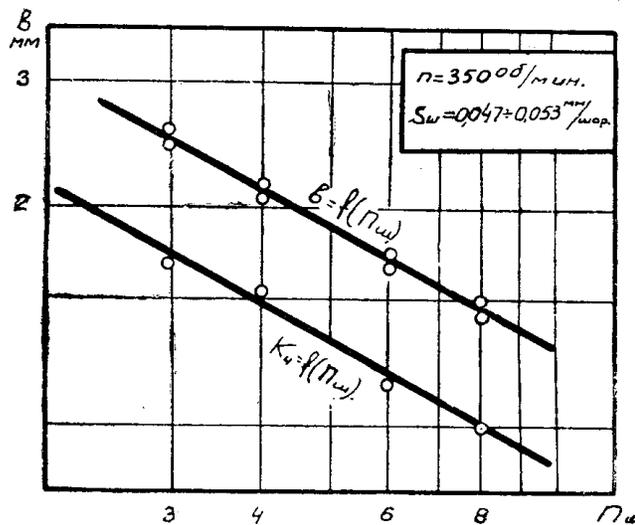
Таблица 8

Значения коэффициента K_4 .				
Количество шариков	8	6	4	3
K_4	1	1,17	1,54	1,69

Из этого же графика коэффициент K_4 может быть выражен уравнением

$$K_4 = \frac{C'_4}{n_{ш}^2}, \quad (13)$$

откуда $C'_4 = 1,26 \cdot 5^{0,534} = 3,02$.



Фиг. 14. Влияние количества шариков оправки на глубину проникновения наклепа

Влияния диаметра шариков на глубину проникновения наклепа нет. Учитывая все условия накатки, уравнение (8) мы можем записать так:

$$b = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \frac{(A_1 - m_1 v)}{S^x}. \quad (14)$$

Подставив значения коэффициентов K_1 и K_4 , получим

$$b = K_2 \cdot K_3 \cdot C'_2 \cdot C'_4 \frac{(A_1 - m_1 v) \delta d^y}{S^x n_{ш}^2}. \quad (15)$$

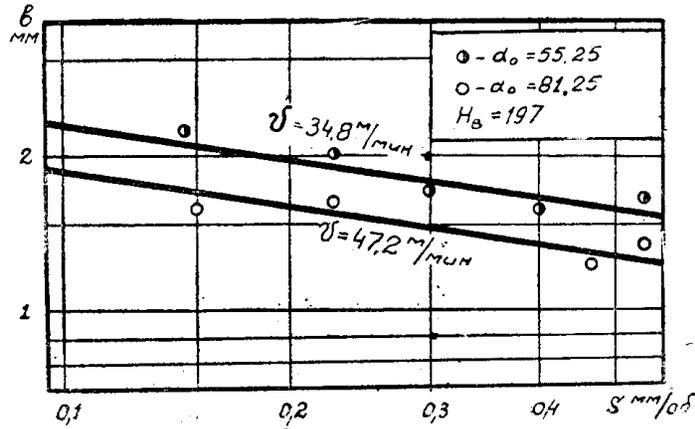
Так как C'_2 и C'_4 постоянные величины, то мы можем их заменить одним коэффициентом C

$$C = C'_2 \cdot C'_4 = 14,6 \cdot 3,02 = 44,092.$$

В окончательном виде уравнение (15) можно записать

$$b = C \cdot K_2 \cdot K_3 \frac{(A_1 - m_1 v) \delta d^y}{S^x n_{ш}^2}. \quad (16)$$

На фиг. 15 дана проверка правильности выведенной формулы. Здесь линии соответствуют теоретическому расчету, а расположенные вокруг них точки соответствуют эксперименту.



Фиг. 15. Контрольные опыты по выявлению влияния скорости накатки на глубину проникновения

точки получены экспериментом. Как видно из графика, получилось полное соответствие.

Выводы

1. Влияние подачи, скорости накатки и числа проходов по слою на величину поверхностной твердости отсутствует в тех случаях, когда величина деформации достигла определенного предела.

2. Величина поверхностной твердости находится в зависимости от первоначальной твердости материала. Относительное увеличение твердости с повышением первоначальной твердости падает.

3. Глубина проникновения деформации является функцией скорости, подачи, числа проходов по слою, разности диаметров инструмента и отверстия, первоначальной твердости обрабатываемой стали и количества шариков оправки.

4. С уменьшением степени деформации за счет ли изменения числа проходов или разности диаметров оправки и отверстия глубина проникновения наклепа уменьшается.

5. Влияние скорости накатки и подачи обратно влиянию степени деформации, а именно: увеличение скорости деформации сопровождается уменьшением величины ее проникновения в глубь металла.

6. Первоначальная твердость материала и количество шариков на глубину наклепа влияют аналогично скоростному фактору, то есть с увеличением твердости и количества шариков она уменьшается.

7. Значение глубины проникновения наклепа в зависимости от ряда факторов может быть выражено математической зависимостью следующего вида

$$b = C \cdot K_2 \cdot K_3 \frac{(A_1 - m_1 v) \delta d^y}{S^x n_{ш}^z}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В и т м а н Ф. Ф. Влияние поверхностной деформации на ударную хладноломкость стали. ЖТФ, т. VII, вып. 9, 1937.
2. О'Н е й л ь Г. Твердость металлов и ее измерение. Металлургиздат, 1940.
3. Р о з е н б е р г А. М. Экспериментальное исследование процесса образования стружки. Известия СТИ, 1929.
4. Сборник сокращенных докладов конференции по резанию металлов. Изд. АН СССР, 1937.
5. Ф о п п е л ь. Длительное испытание металлов, 1929.
6. Ш м а л ь ц Г. Качество поверхности. Машгиз, 1941.