

Глава 8

УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Упрочнение методами поверхностного пластического деформирования без использования внешней теплоты

Поверхностное пластическое деформирование используют для повышения сопротивления усталости и твердости поверхностного слоя металла, а также для формирования в этом слое направленных внутренних напряжений (преимущественно напряжений сжатия) и образования регламентированного рельефа микронеровностей на поверхности.

Эффективно применение упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей машин взамен операций окончательной обработки резанием лезвийным или абразивным инструментом. При обработке нежестких в сечении тонкостенных деталей наиболее пригодна динамическая обработка пластическим поверхностным деформированием инструментами ударного действия, ультразвуковое или импульсное обкатывание.

Наклеп. Пластическое деформирование, выполняемое без использования внешней теплоты для обеспечения нужного комплекса свойств поверхностного слоя, называют *наклепом*, а слой металла, в котором проявляются эти свойства, соответственно – *наклепанным*.

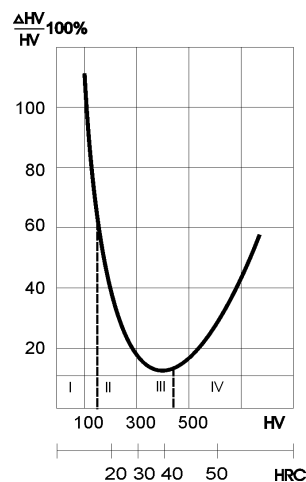
В результате наклепа повышаются все характеристики сопротивления металла деформации, понижается его пластичность и увеличивается твердость. Упрочнение незакаленной стали происходит в результате изменения структурных несовершенств (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.), дроблением блоков и созданием микронапряжений. При упрочнении закаленных сталей, помимо этого, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц. Поверхностная деформация приводит к образованию сдвигов и упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен.

Интенсивность наклепа тем выше, чем мягче сталь. У закаленных сталей в результате поверхностного деформирования можно получить увеличение твердости более чем на 100%, а у закаленных – только на 10-15%. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами (рис. 40), наименьшее – с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате наклепа составляет: для мартенситных структур 180-320 НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит, 60-120 НВ. Значительное увеличение твердости мартенситных структур объясняется тем, что, помимо упрочнения пластическим деформированием, происходит частичное превращение аустенита в мартенсит и выделение высокодисперсных карбидных частиц.

Наклеп поверхности выполняют бомбардированием ее струей стальной или чугунной дроби и шариков, а также суспензией, содержащей абразивные частицы;

Рис. 40. Относительное увеличение твердости углеродистых и легированных сталей при пластическом деформировании в различных структурных состояниях при степени деформации $d/D = 0,5$:

**I – феррит и феррит + перлит; II – перлит;
I – сорбит; IV – тростит и мартенсит**



обкатыванием роликами, шарами или ротационным инструментом; чеканкой. Дробеструйный наклеп обеспечивает неглубокую пластическую деформацию до 0,5-0,7 мм. Применяют для обработки поверхностей небольших деталей сложных форм, а также деталей малой жесткости типа пружин, рессор, мембран и др.

Для обработки чаще всего применяют стальную дробь (реже – литую чугунную) диаметром 0,8-2 мм. Глубина наклепа при дробеструйной обработке не превышает 0,8 мм. Поверхность детали приобретает некоторую шероховатость; последующей обработке не подвергается. Режим обработки определяется скоростью подачи дроби (до 90 м/с), расходом дроби в единицу времени и экспозицией – временем, в течение которого обрабатываемая поверхность находится под ударами дроби. Режимы обработки устанавливают экспериментально. Поверхность детали должна быть полностью покрыта следами – вмятинами. Обычно экспозиция равна 0,5-2 мин на обрабатываемую поверхность.

Обкатку роликами или шариками осуществляют с помощью различных приспособлений, устанавливаемых на токарных или строгальных станках. Приспособления изготовляют одно- или многороликовыми. Давление роликов или шариков создают механическим (пружинным) или гидравлическим способом. Пружинящие элементы тарируют, что дает возможность нормировать давление на ролики. Обкатку роликами или шариками применяют при обработке деталей типа осей, валов и других деталей, имеющих форму тел вращения, реже – плоские поверхности. Устанавливают следующие параметры упрочняющей обкатки роликами: давление на ролик, форму и размеры ролика, продольную подачу и скорость обкатки.

Поверхностная твердость обрабатываемого материала и глубина пластической деформации зависят от режимов упрочнения, физико-механических свойств, структуры и химического состава материала. Наибольшее влияние на поверхностную твердость оказывает давление деформирующего элемента в месте контакта с обрабатываемой деталью и кратность приложения этого давления. Значение давления определяется силой обкатывания, геометрией деформирующего элемента и детали, а также физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Кратность приложения давления зависит от подачи, длины линии контакта, числа проходов и деформирующих элементов.

Соотношение между давлением (нагрузением) и кратностью ее циклического приложения можно определить по формуле

$$\frac{l}{S} i \leq \left(\left(\frac{\sigma_B}{kfHB} \right) \right)^t,$$

где l – длина контакта инструмента с изделием в направлении подачи с учетом упругой деформации; S – подача; i – число проходов; t – показатель кривой усталости, определяемый углом наклона прямой в логарифмических координатах; σ_B – временное сопротивление материала; r – коэффициент, характеризующий напряженное состояние и зависящий от природы материала; f – коэффициент трения; HB – твердость по Бринеллю;

$$HB = \frac{4P}{\pi d^2}.$$

Сила, действующая на деформирующий элемент, ориентировочно определяется по формуле

$$P = 2a^2 \sigma_T,$$

где σ_T – предел текучести упрочняемого металла; a – глубина наклепа; обычно $0,02R_3 \leq a \leq 0,1R_3$; R_3 – радиус поперечного сечения упрочняемой детали.

При определенной геометрии деформирующего ролика с увеличением давления и кратности его приложения к поверхности детали *степень наклепа* возрастает примерно прямо пропорционально только до достижения давлением предельно допустимого значения. Превышение этого давления или числа циклов нагружения сопровождается остановкой роста твердости и ее снижением в связи с *перенаклепом*, т. е. разрушением поверхностного слоя металла, возникающим в результате наступившего предела пластического деформирования его кристаллической решетки. Соотношение нагружающей силы и числа циклов ее приложения [например, применительно к условиям обкатывания шаром поверхности стальной (сталь типа 15X28) детали при $t = 10$ и $\sigma_B = 3,10$ ГПа] приведено на графике на рис. 41. Кривая характеризует режимы, позволяющие получить максимальную степень упрочнения (зона ниже кривой). Область, расположенная выше кривой, определяет режимы обработки, вызывающие перенаклеп.

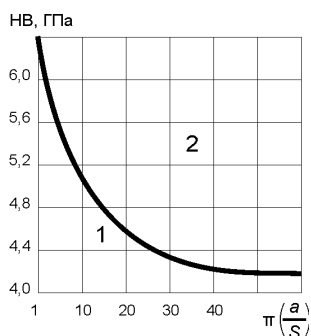


Рис. 41. График оптимальных режимов, обеспечивающих максимальную степень упрочнения: 1 – область режимов неполного наклепа; 2 – область режимов, вызывающих перенаклеп; HB – твердость;

$$\tau = b \left(\frac{D-d}{2} \right) - \text{кратность приложения нагрузки}$$

Необходимая степень упрочнения достигается выбором одного из множества сочетаний HB, t, S, i . Конкретные значения указанных параметров определяют, исходя из конструктивных особенностей обрабатываемой детали, производительности процесса и т. п.

При упрочняющем обкатывании шаром степень пластической деформации $\epsilon = d/D$, где d и D – диаметры, соответственно, лунки на поверхности и вдавливаемого шара; $\epsilon \leq 0,4 \div 0,5$; деформация более 0,5 практически не обеспечивает увеличения твердости деформируемого металла.

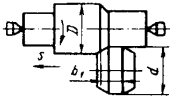
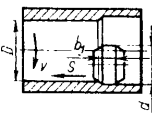
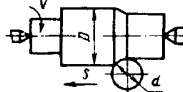
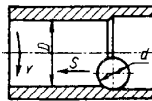
При обкатывании роликом степень деформации определяют из соотношения $\epsilon = b/(2r)$, где b – ширина единичной канавки, возникающей как след от обкатки роликом; r – профильный радиус ролика; $\epsilon \leq 0,4 \div 0,5$.

Профильный радиус обкатывающего ролика должен быть возможно меньшим для заданной глубины наклепа. Если при обкатывании наблюдается шелушение поверхности, то размер профильного радиуса ролика увеличивают. Для упрочнения деталей малой жесткости необходимо использовать деформирующие элементы с малым профильным радиусом, что позволит получить максимальное увеличение твердости при незначительных усилиях.

При обкатывании роликами достаточно одного прохода роликов по упрочняемой поверхности. Последующие проходы не создают дополнительного наклепа и не увеличивают его глубину.

Формулы для расчета режима упрочнения методом обкатывания роликами и шариками приведены в табл. 1 и 2; рекомендуемые значения давления на обрабатываемую поверхность применительно к некоторым методам упрочнения пластическим деформированием с наклепом – в табл. 3.

1. Формулы для расчета сил пластического деформирования поверхности методами обкатывания

Инструмент	Схема обработки	Формула
Ролик		$P = \frac{Dd_1q^2}{0,126 E(D/d + 1)}$
		$P = \frac{Db_1q^2}{0,18 E(D/d - 1)}$
Шарик		$P = \left(\frac{dq}{0,045 E} \right)^2 q$ при $D/d \geq 10$
		$\left[P = \left[\frac{Dq}{0,054 E(D/d - 1)} \right]^2 q \right]$

Обозначения: P – сила обкатывания, Н; q – максимальное давление обкатывания, Па; D – диаметр обкатываемого изделия, мм; d – диаметр ролика или шарика, мм; b_1 – ширина контакта ролика с обрабатываемым изделием, мм; E – модуль упругости обрабатываемого материала, Па.

2. Формулы для расчета режимов обкатывания

Параметры	Формулы	Обозначения
Скорость v , м/мин: для станков с вращательным движением (токарных, револьверных, расточных, сверлильных, фрезерных и др.)	$v = \frac{\pi D n}{1000}$	D – диаметр обрабатываемой детали, мм; n – частота вращения шпинделя станка, мин ⁻¹
То же, для станков с возвратно-поступательным движением (строгальных, долбежных и др.)	$v = \frac{L n (1 + m)}{1000}$	L – длина рабочего хода детали или накатного ролика (шарика) в направлении рабочего движения, мм; n – число двойных ходов, мин; m – отношение скорости рабочего хода к скорости холостого хода
Подача на один ролик (шар) при обработке многороликовыми обкатками $S_{ш}$, мм/об	$S_{ш} = S/z$	S – подача на оборот или двойной ход, мм; z – число роликов или шариков в обкатке (раскатке)

3. Давление на поверхность при упрочнении поверхностным пластическим деформированием с наклепом

Упрочняемый материал	Предварительная обработка поверхности			Давление, ГПа				
	Метод	Подача, мм/об (мм/дв. ход)	Высота неровностей, мкм	При статическом сдавливании неровностей	Поперек рисок микропрофиля	Вдоль рисок микропрофиля	Роликом	Шариком
Стали: 10, 20, 35	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	90-130	0,70-1,1	0,40-0,75	0,80-0,11	0,75-0,10
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	70-110	0,40-0,75	0,30-0,45	0,60-0,80	0,55-0,95
	Строгание	(До 0,2)	10-40	40-70	0,25-0,20	0,20-0,35	0,30-0,60	0,25-0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	50-80	0,30-0,60	0,20-0,35	0,40-0,70	0,35-0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20-50	0,22-0,40	0,20-0,35	0,20-0,45	0,20-0,40
45, 50Г	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	130-160	0,75-0,10	0,35-0,70	0,12-0,14	0,11-0,13
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	110-140	0,50-0,80	0,30-0,40	0,10-0,12	0,90-0,11
	Строгание	(До 0,2)	10-40	80-100	0,30-0,60	0,20-0,35	0,50-0,80	0,40-0,70
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	60-90	0,35-0,75	0,25-0,40	0,50-0,80	0,40-0,70
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	40-60	0,25-0,40	0,25-0,40	0,35-0,50	0,30-0,40
Латунь Л-62	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	85-120	0,70-0,100	0,45-0,75	0,80-0,11	0,75-0,115
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	70-100	0,40-0,70	0,40-0,65	0,60-0,80	0,55-0,75
	Строгание	(До 0,2)	10-40	40-65	0,25-0,50	0,25-0,45	0,35-0,55	0,30-0,55
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20-45	0,20-0,40	0,20-0,35	0,20-0,45	0,20-0,40
Чугун СЧ12	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	90-125	0,75-0,11	0,50-0,80	0,85-0,11	0,80-0,10
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	75-110	0,45-0,75	0,45-0,70	0,60-0,80	0,55-0,80
	Строгание	(До 0,2)	10-40	45-70	0,30-0,55	0,30-0,50	0,30-0,60	0,25-0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	45-65	0,30-0,60	0,30-0,55	0,40-0,70	0,35-0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	25-50	0,25-0,45	0,20-0,35	0,20-0,45	0,20-0,40

Упрочнению роликами подвергают развертки, зенкеры и фрезы, изготовленные из сталей P18 и P9, после термообработки и шлифования. В качестве деформирующих элементов используют ролики высокой твердости (из стали ХВ4) с прямолинейной или криволинейной образующей.

Упрочняемый инструмент зажимают в центрах. Приспособление с одним или двумя (рис. 42) роликами устанавливают на резцедержателе токарного станка. Поворот инструмента на шаг между зубьями проводят с помощью делительного приспособления. Фиксирующим устройством, расположенным на заднем центре, удерживают инструмент от проворота.

Развертки и зенкеры упрочняют по задней поверхности режущей и калибрующей частей и обратного конуса; фрезы – по задней поверхности зубьев. Оптимальным можно считать $P = 750 \div 1000$ Н при диаметре роликов 35 мм. Диаметр разверток в процессе упрочнения изменяется на 0,05-0,08 мм. Под упрочнение разверток, предназначенных для обработки отверстий с параметром шероховатости $Rz = 80 \div 40$ мкм, необходимо оставлять припуск 0,04-0,06 мм.

Время доводки развертки составляет 3-5 мин. На упрочнение развертки при использовании одноролькового приспособления затрачивают 8-10 мин, двухролькового – 4-5 мин. Таким образом, время, затрачиваемое на доводку и упрочнение разверток, примерно одинаково, но в последнем случае повышается качество обрабатываемой поверхности и стойкость инструмента, что обуславливает экономический эффект применения метода упрочнения.

В результате упрочнения параметры шероховатости инструмента уменьшаются от $Ra = 0,63$ до $Ra = 0,040$ мкм, твердость поверхностного слоя возрастает, количество остаточного аустенита в слое значительно уменьшается.

В процессе упрочнения возникает скругление радиусом r (рис. 43) при переходе режущей части развертки в калибрующую, что является положительным фактором, так как предотвращает быстрое изнашивание инструмента, изменяется геометрия его передней поверхности (рис. 44), образуется передний угол

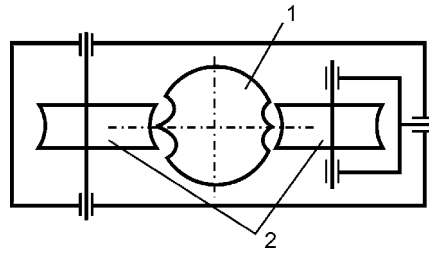


Рис. 42. Схема упрочнения режущего инструмента в самоустанавливающемся двухрольковом приспособлении: 1 – упрочняемый инструмент; 2 – ролики

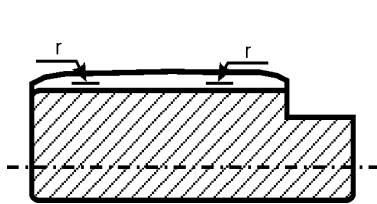


Рис. 43. Геометрия упрочненного зуба развертки в продольном сечении

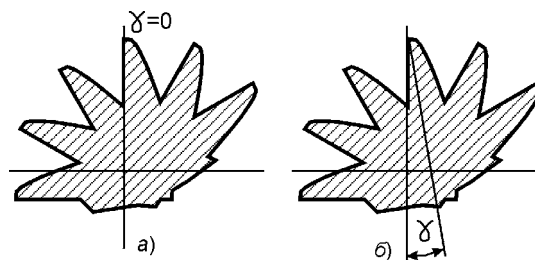


Рис. 44. Геометрия неупрочненных (а) и упрочненных (б) зубьев развертки в поперечном сечении

$\gamma = 8 \div 10^\circ$, который увеличивается при возрастании силы P . Радиус скругления режущих кромок в этом случае получается несколько меньшим, чем при шлифовании, и составляет 15-20 мкм. Указанные изменения геометрии инструмента оказывают благоприятное воздействие на процесс резания.

Обработка инструмента и деталей технологической оснастки методом алмазного выглаживания. Эту операцию применяют для упрочнения изделий твердостью до 65 HRC, а также вместо операции окончательного шлифования, полирования, доводки и суперфиниширования поверхности. Метод универсален и широко применяется для обработки стальных закаленных или термически неупрочненных деталей, с поверхностными покрытиями и без них, а также деталей из цветных металлов, их сплавов, высокопрочных чугунов. Выглаживание выполняют специальными инструментами – выглаживателями, оснащенными сфероидальными, трапециевидными или конусообразными деформирующими элементами, изготовленными из синтетических сверхтвердых материалов – карбонада, гексанида-Р, эльбора-Р и других материалов, реже – из природных алмазов или твердых сплавов.

В инструментальном производстве алмазное выглаживание используют при обработке колонок и направляющих втулок штампов для холодной штамповки, пуансонов, вкладышей пресс-форм, формообразующих поверхностей вытяжных штампов, зубьев круглых деформирующих, уплотняющих протяжек, прошивок, мерительных поверхностей и калибров-пробок. Износостойкость выглаженной поверхности увеличивается в 2-3 раза по сравнению со шлифованной и на 20-40% по сравнению с полированной; износостойкость и контактная выносливость выглаженной хромированной поверхности на 35-50% выше полированной.

Гидроабразивное упрочнение. Наклеп поверхностного слоя струей суспензии (жидкость с абразивными частицами) применяют для случаев, когда необходимо получить упрочненный слой небольшой глубины. Подача абразивной суспензии к соплам установок для гидроабразивной обработки осуществляется в зависимости от конструктивных особенностей и типа установки самотеком, инжекцией сжатым воздухом или под давлением с помощью насоса.

Гидроабразивное упрочнение стальных и твердосплавных инструментов. На поверхностях и гранях твердосплавных пластин и инструментов после спекания могут образоваться специфические дефекты, из которых наиболее характерными являются рваные кромки, заусенцы (наплывы), микротрещины и микропоры, неравномерность химического состава, оксидные пятна, неравномерность распределения твердости (пятнистость), ликвация и зоны высокой концентрации металлов (например, кобальта), входящих в состав сплава в качестве наполнителя и связки и отличающихся повышенной вязкостью. По этим причинам могут возникать “вторичные” дефекты – внутренние напряжения, вспучивания, искажения геометрических форм и т. п. Дефекты снижают прочность поверхностного слоя, увеличивают силу трения, создают условия для возникновения нежелательного эффекта “схватывания” металла стружки с вязкими участками на поверхности твердого сплава. Эти участки служат очагами концентрации напряжений и центрами разрушений, преобладающей причиной поломок и преждевременного изнашивания твердого сплава при эксплуатации инструментов. На поверхностях стальных, окончательно обработанных инструментов, также имеется большинство перечисленных дефектов. Кроме того, поверхностный слой металла закаленного инструмента часто содержит в себе скрытые дефекты

– зашлифованные прижоги, растягивающие внутренние напряжения, зоны водородного насыщения, зоны повышенной концентрации аустенитных структурных включений.

Гидроабразивная обработка поверхностных слоев инструментальных материалов позволяет ликвидировать большинство из указанных дефектов и тем самым увеличить стойкость инструментов на 25-40%. Процесс проводят либо на гидроабразивных установках, либо с помощью центробежно-планетарных машин. При обработке поверхностей абразивное воздействие оказывают гранулы, бой абразивных инструментов, фарфоровые, стеклянные или стальные закаленные шарики, кварцевый песок. Для обработки пластин твердого сплава успешно применяют абразивный порошок зеленого карборунда марки КЗ 160. Состав рабочего раствора, г/л: триэтаноламин 6-8; калий хромовокислый 9-10 или жидкое стекло 3-4; вода – остальное.

Длительность процесса обработки в центробежно-планетарных машинах 40-60 мин. Целесообразно подразделять цикл процесса на два этапа – предварительную и финишную обработки. На первом этапе (продолжительность 10-15 мин) при частоте вращения рабочей кассеты $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ притупляются острые кромки на ребрах и вершинах пластин, частично снимается дефектный поверхностный слой. Окончательную обработку выполняют в течение 40-50 мин при $n = 300 \div 350 \text{ мин}^{-1}$. На этом этапе скругляются режущие кромки до радиуса 15-50 мкм, полностью снимается дефектный поверхностный слой. В процессе обработки обеспечивается создание упругих деформаций сжатия, оказывающих положительное влияние на стойкость инструмента. Процесс экономически эффективен даже при малых партиях упрочняемого инструмента.

Упрочнение чеканкой состоит в упорядоченном ударном воздействии на упрочняемую поверхность специальными бойками механизированного инструмента – пневматического, электрического или механического.

Применяют инструменты с одним бойком и многобойковые ротационные – шариковые и роликовые. Ударные бойки (шары или ролики) расположены в гнездах дисков-роторов. При их вращении в контакте с обрабатываемой поверхностью бойки поочередно наносят на нее удары, создавая эффект наклепа. *Ротационную чеканку* используют для упрочнения деталей с малой жесткостью или для обработки внутренних поверхностей.

Вибрационно-упрочняющая обработка (чеканка) является разновидностью метода чеканки деформирующими бойками. При вибрационной отделочно-упрочняющей обработке происходит многократное соударение частиц рабочей среды с деталью, вызывающее поверхностное упруго-пластическое деформирование. Операцию выполняют в среде вибрируемых стальных закаленных шаров или роликов. Применяют для получения наклепа и образования сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое металла детали с целью повышения износостойкости и сопротивления усталости.

Наибольшие значения глубины наклепа и остаточных сжимающих поверхностных напряжений достигаются при виброобработке стальными роликами. При обработке деталей с исходным параметром шероховатости поверхности более $Rz = 20 \text{ мкм}$ возможно ухудшение качества поверхности.

Лучших результатов достигают при обработке в среде стальных закаленных полированных шаров диаметром 2-16 мм, что позволяет значительно снизить числовые значения параметра шероховатости.

В процессе отделки и упрочнения поверхности деталей в среде закаленных тел типа шаров происходит уменьшение шероховатости поверхности, образование наклепа и сжимающих остаточных напряжений. Глубина наклепа и напряжения при этом меньше, чем при обработке поверхностей роликами. После вибрационной обработки в среде стальных закаленных шаров можно получить параметры шероховатости поверхности $Ra = 0,63 \div 0,040$ мкм. Значения параметра шероховатости поверхности зависят от исходной шероховатости и твердости материала обрабатываемой детали.

Продолжительность вибрационной обработки не должна превышать 200 мин; ее можно уменьшить, увеличивая частоту и амплитуду колебаний, изменяя характер рабочей среды и искусственно увеличивая массу детали (крепление на специальные оправки; обработка нескольких деталей, жестко связанных одна с другой). Наибольшей интенсивности процесс обработки достигает при неподвижном закреплении детали. Сила P микроудара при обработке деталей, закрепленных в вибробункере со свободно перемещающимися шарами или роликами (вибросредой), может быть определена по формуле

$$P_{\text{зак}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \frac{4R}{r^2} \left(1 - \frac{3}{8} K^2 \right)$$

В случае свободной загрузки деталей, т. е. если детали не крепятся к корпусу вибробункера и могут свободно перемещаться в вибросреде, силу микроудара P можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{св}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \frac{4R}{r^2} \left\{ \frac{5}{8} \left[1 - (1 + K) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right]^2 + (1 - K^2) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right\}$$

В формулах m_1 и m_2 – приведенная масса соответственно: частицы рабочей среды и обрабатываемой детали; v – скорость частицы рабочей среды при ударе; R – радиус частицы рабочей среды; r – радиус отпечатка на обработанной поверхности после удара частицы; K – коэффициент восстановления при ударе.

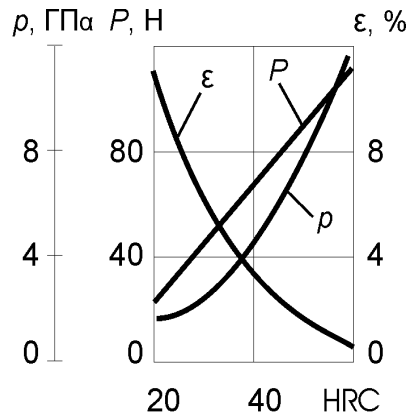
Контактные давления определяют по формуле $p = P/(\pi r^2)$; степень деформации принимают равной $\varepsilon = r/R$, где R – радиус инструмента (шара или ролика).

Режим виброупрочняющей обработки зависит от твердости и вязкости обрабатываемого металла. Например, для стали марки 40Х с увеличением ее твердости от 20 до 60 HRC степень деформации уменьшается с 5 до 0,5%; контактные давления возрастают с 0,5 до 12 ГПа (рис. 45).

Режим виброупрочняющей обработки можно определить по номограммам в зависимости от требуемой шероховатости поверхности и глубины наклепа. С учетом исходной шероховатости и твердости, характера частиц рабочей среды, частоты и амплитуды колебаний камеры, массы детали определяют продолжительность обработки.

По номограмме на рис. 46 устанавливают режим виброупрочняющей обработки, выполняемой с целью изменения шероховатости поверхности детали. На номограмме приведены данные для обработки деталей с исходными параметрами

Рис. 45. Зависимость силы P удара, контактных давлений p и степени деформации ε от твердости обрабатываемой стали при вибрационной обработке



ми шероховатости $Ra = 2,5 \pm 0,16$ мкм, однако можно обрабатывать детали и с большими параметрами шероховатости.

По номограмме на рис. 47 определяют режим обработки, осуществляемой для получения заданной глубины наклепанного слоя. Глубина наклепа зависит от твердости обрабатываемого материала. Для сталей твердостью 50-60 HRC глубина наклепа при всех условиях и режимах обработки не превышает 0,1 мм. С уменьшением твердости стали глубина наклепа увеличивается (при одинаковых условиях обработки) и при твердости 20 HRC достигает 0,3 мм. При рекомендуемых условиях обработки степень наклепа достигает 30-60%.

В номограммах приведены данные для расчета режимов виброупрочняющей обработки в среде частиц типа шариков и роликов различного размера, изготовленных из закаленной стали ШХ15 (60-65 HRC); материал обрабатываемых деталей – углеродистые и легированные стали различных структурных состояний и следующей твердости HRC: 20 (структура: феррит, феррит + перлит); 30 (перлит); 40 (сорбит); 50-60 (мартенсит, троостит). На расчетных режимах проводят виброупрочняющую обработку с постоянной промывкой 3%-ным водным раствором кальцинированной соды.

Рекомендуемая амплитуда колебаний вибробункера в вертикальной плоскости составляет 0,5-6,0 мм; диапазон частот: 8, 16, 25, 33 и 42 Гц. Нецелесообразно проводить обработку при частоте колебаний более 42 Гц, так как в этом случае нарушается нормальная работа вибрационной установки. При обработке нужно учитывать массу деталей, закреплять их неподвижно.

Порядок расчета по номограммам: по требуемой шероховатости поверхности или глубине наклепа с учетом исходной шероховатости и твердости поверхности определяют характер рабочей среды, частоту и амплитуду колебаний камеры вибрационной установки. После этого, зная массу детали, определяют продолжительность обработки на установленных режимах.

Вибрационное упрочнение твердых сплавов наиболее эффективно при выполнении варианта – *виброабразивная обработка с последующим виброупрочнением* в среде, содержащей в качестве наполнителя твердосплавные шарики; виброабразивную обработку осуществляют в абразивных средах – из порошков и боя абразивных кругов белого и хромистого электрокорунда, черного карборунда, отработавших пластин минералокерамики (например, марки ЦМ332).

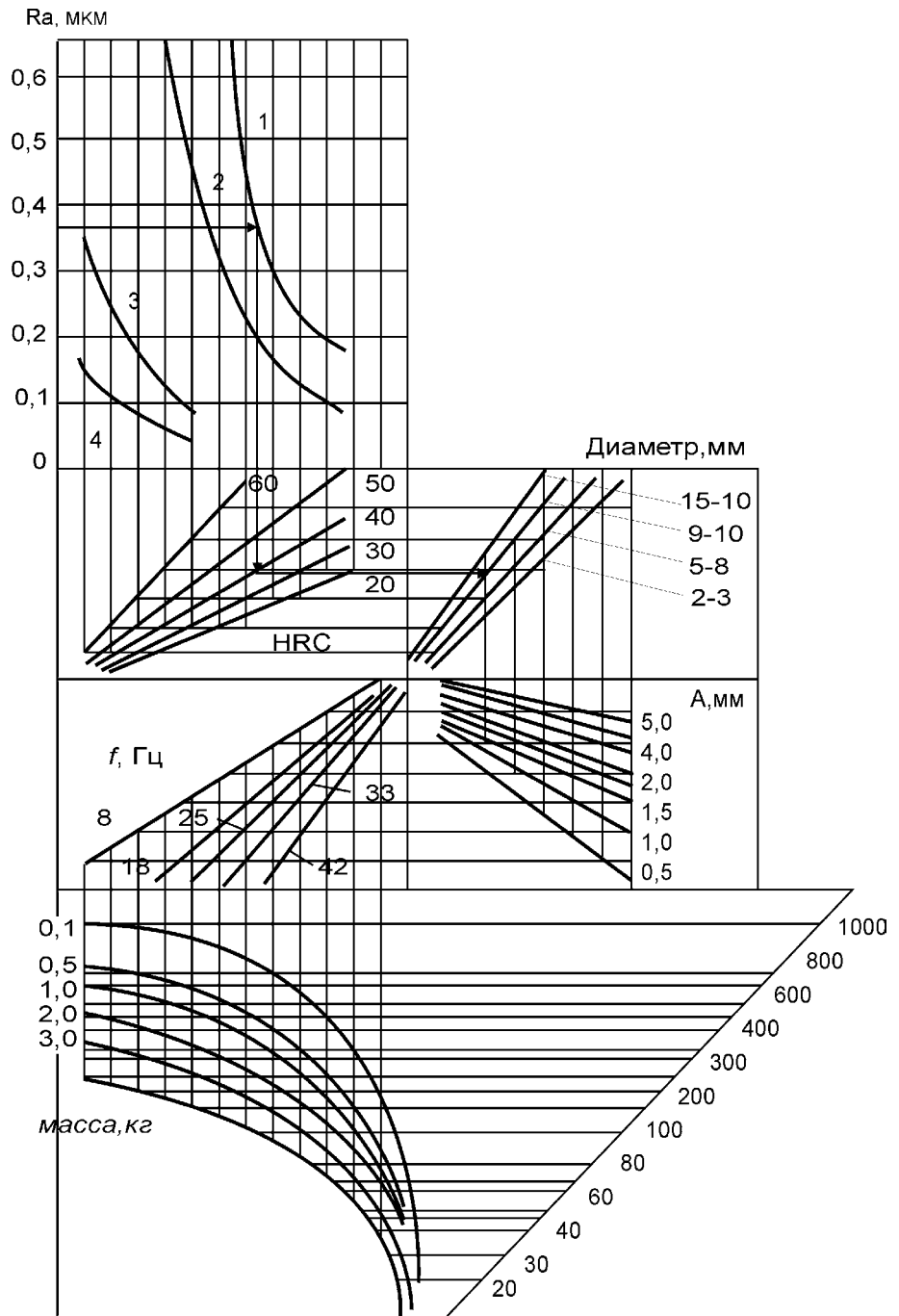
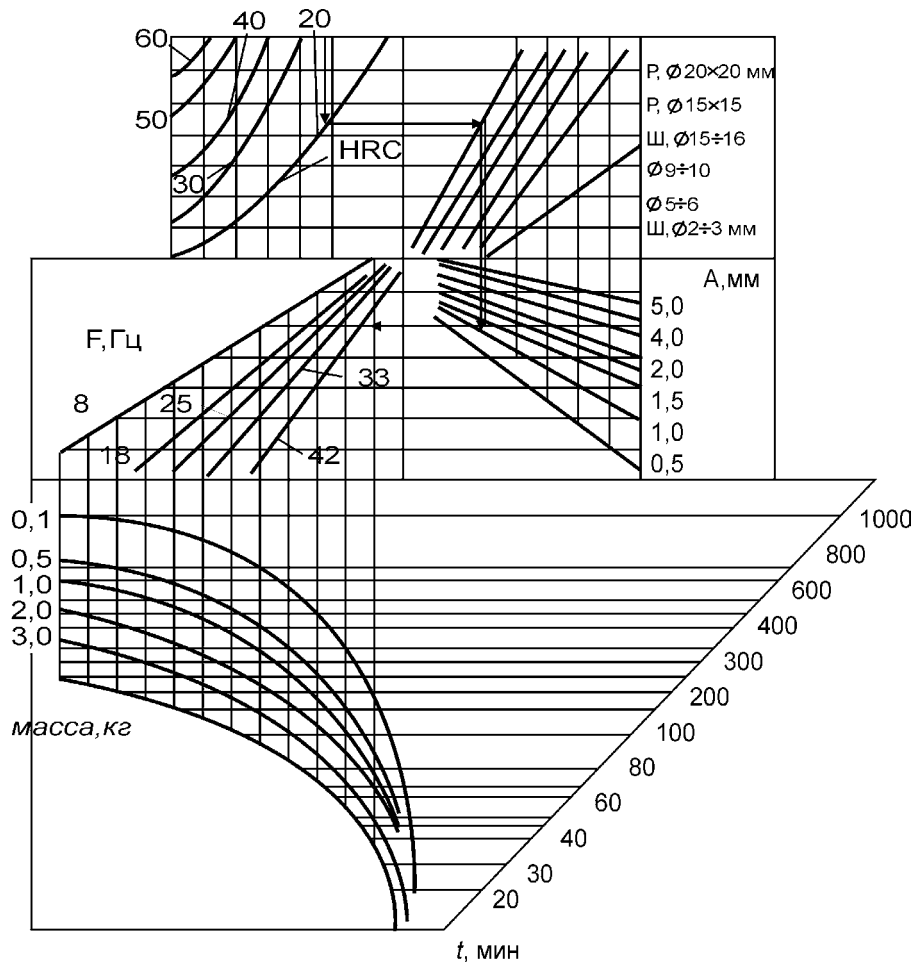


Рис. 46. Номограмма для расчета режима виброупрочняющей обработки в зависимости от требуемой шероховатости поверхности: 1 – 20 HRC; 2 – 30 HRC; 3 – 40 HRC; 4 – 50 HRC; A – амплитуда колебаний



**Рис. 47. Номограмма для расчета режима виброупрочняющей обработки в зависимости от глубины наклепанного слоя:
Р – ролик, Ш – шарик, А – амплитуда колебаний**

При виброупрочнении твердосплавных изделий несложной конфигурации форма обрабатываемых тел не оказывает существенного влияния на эффективность обработки. Использование твердосплавных цилиндрических тел дает такой же эффект, как и применение твердосплавных шариков. Производительность виброобработки, качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства твердосплавных изделий зависят от режимов обработки (частоты и амплитуды колебаний контейнера, продолжительности процесса) и от природы обрабатываемых сред. Виброупрочнение твердосплавных изделий выполняют при амплитуде колебаний вибробункера, равной 2-3 мм, частоте 1500 мин^{-1} . Время виброабразивной обработки составляет 2-3 ч [для сплавов типов ВК6, ВК8 (нижний предел) и ВК15 (верхний предел)]. Продолжительность виброупрочняющей обработки соответственно равна 3-4 и 1,5-2 ч. В результате виброобработки твердого сплава по-

вышаются его ударная вязкость, предел прочности при изгибе, твердость, снижается шероховатость поверхности. Виброупрочнение эффективно для увеличения эксплуатационной стойкости твердосплавных инструментов, особенно с механически закрепленными рабочими твердосплавными элементами – режущими пластинами, фильерами, матрицами, калибрующими кольцами протяжек и т. п.

Упрочняющая обработка поверхностей металлическими щетками проводится с использованием вращающихся металлических щеток различных конструкций, в том числе с лепестковыми рабочими элементами, иглофрезами, торцовыми щетками, лепестковыми кругами, нейлоновыми вращающимися щетками с ударными элементами в виде шайб, звездочек, пластин, скрепленных прядей троса, а также секционными и пучковыми щетками, виброторцовыми и торцовыми щетками с ударными элементами.

В качестве рабочих элементов чаще всего используют металлическую проволоку диаметром 0,2-0,8 мм, соединенную в пучки и размещенную между фланцами. *Дисковыми щетками* обрабатывают все виды поверхностей. Режимы обработки такими щетками: скорость обработки 15-45 м/с, скорость подачи (лимитируется исходным состоянием поверхности) 0,5-30 м/мин и более, натяг 0,5-5 мм. Толщина поверхностно упрочненного слоя достигает 0,05-0,1 мм. Микротвердость повышается на 20-50%. В поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия.

При контактировании рабочей части проволочного элемента щетки с поверхностью детали возможны три варианта формирования рельефа поверхности: сглаживание, царапание, микрорезание.

Сглаживание поверхности в основном происходит при мягких режимах обработки, т. е. при малой жесткости проволочных элементов, незначительном натяге, больших скоростях обработки и т. п. Притупление вершин микрорельефа обеспечивается в результате ударов проволочных элементов на линии атаки, а также их скольжения, трения по поверхности на линии контакта. Увеличение скорости обработки при прочих равных условиях сопровождается увеличением температуры поверхностного слоя и более активным ее преобразованием, наблюдаются мостики сварки, поверхность приобретает бархатистый вид.

Формирование рельефа поверхности зависит от сочетания направлений вращения инструмента и перемещения детали (инструмента). Обработка вращающимися щетками выполняется по встречной и попутной схемам. При попутной обработке направление подачи детали или перемещения щетки совпадает с направлением ее вращения, а при встречной – нет.

При *встречной обработке* рельеф поверхности формируется в основном за счет ударов, уколов, создаваемых проволочными элементами на линии атаки.

Обрабатываемая поверхность сначала подвергается воздействию на нее проволочных элементов в процессе скольжения по поверхности, а потом их ударному воздействию на линии атаки. При попутной обработке наблюдается обратное явление.

Микрорельеф поверхности при *попутной обработке* формируется в результате скольжения и трения рабочих элементов по обрабатываемой поверхности. Царапание поверхности и микрорезание выполняют при повышенной жесткости рабочих элементов щеток.

При попутной обработке щеткой с упругим креплением проволочек наибольшее влияние на качество поверхности оказывают частота вращения щетки и

диаметр ударного элемента, а при встречной обработке – натяг и масса ударного элемента; при попутной обработке щеткой со свободным соединением ударного элемента в виде толстой проволоочки с корпусом щетки существенное влияние оказывает жесткость зачистных элементов и число ударных секций, а при встречной обработке – частота вращения щетки, натяг, жесткость зачистных элементов и особенно их масса.

Обработка металлической поверхности щетками сопровождается уменьшением микронеровностей; параметры обработанной поверхности зависят от исходной шероховатости, а также жесткости рабочих элементов. Чем тверже обрабатываемая поверхность, тем лучше ее обрабатываемость.

Максимальная толщина упрочненного слоя при обработке конструкционных сталей обычными вращающимися металлическими щетками не превышает 0,02-0,07 мм. При обработке заготовки из стали 14ХНЗМА секционной щеткой с коэффициентом плотности набивки 0,12-0,15, натяге 4 мм, времени экспонирования 20 с толщина упрочненного слоя возрастает с увеличением скорости обработки и при $v = 38$ м/с достигает 0,08 мм, повышается микротвердость поверхностного слоя на 10-30%.

При работе в режиме резания с увеличением подачи микротвердость снижается на 3-6%. Увеличение скорости обработки от 2 до 5 м/с сопровождается повышением микротвердости на 5%. Возрастание микротвердости на 10-12% наблюдается при увеличении силы прижатия от 400 до 1000 Н.

Микротвердость поверхностных слоев убывает по глубине и зависит от подачи. Уменьшение подачи сопровождается увеличением микротвердости поверхности и ее однородности. Увеличение подачи вызывает неоднородность поверхностного слоя, а следовательно, и уменьшение его твердости. Скорость вращения щетки также оказывает значительное влияние на микротвердость – ее увеличение вызывает рост микротвердости.

Повышение натяга и скорости обработки сопровождается уменьшением Ra . Увеличение подачи вызывает обратное явление. С учетом этих зависимостей обработку поверхностей целесообразно выполнять при скорости 15-35 м/с. Натяг не должен превышать 3 мм. Подача зависит от исходного состояния поверхности.

Длина вылета ворса (пряжи), обеспечивающая минимальную шероховатость поверхности, составляет 50-75 мм, скорость обработки – 25-38 м/с. Снижение параметров шероховатости в 1,2-4 раза происходит в основном в результате сглаживания микронеровностей, образовавшихся при предшествующей обработке поверхности.

Минимальное значение $Rz = 20 \div 40$ мкм получают при скорости обработки стали 3-5 м/с и силе прижатия щетки 80-100 Н. Увеличение подачи от 100 до 400 мм/мин значительно влияет на изменение параметра Rz . Такими же соотношениями можно руководствоваться при назначении режима обработки чугуна.

Обработка заготовок из алюминиевого сплава, например АЛ7, щеткой с упругим зажимом проволоочного ворса при силе прижатия 150-350 Н, $v_{щ} = 4 \div 6,5$ м/с и $S_{пр} = 200 \div 1000$ мм/мин обеспечивает шероховатость поверхности с параметром $Rz = 10 \div 40$ мкм.

Важнейшей технической характеристикой процесса обработки изделий вращающимися металлическими щетками, снабженными ударными элементами, является коэффициент перекрытия K :

в продольном направлении $K_{пр} = 1 - k_{пр}$;

в поперечном направлении $K_{п} = 1 - k_{п}$.

В формулах $k_{п} = S_{п}/b$ и $k_{пр} = S_{пр}/a$ – относительные величины непокрытых размеров лунки, соответственно, в поперечном и продольном направлениях; a и b – соответственно длина и ширина лунки; $S_{п}$ и $S_{пр}$ – средний шаг между соседними лунками, соответственно, в поперечном и продольном направлениях.

Значение коэффициента перекрытия зависит от режима обработки и параметров щетки. Подачу изделия или инструмента в продольном направлении с учетом необходимого коэффициента перекрытия определяют по формуле

$$S_{пр} = S_z z K_{пр} n / 60$$

или

$$S_{пр} = \pi d S_z z (1 - K_{пр}) / (1000 v \cdot 60),$$

где S_z – подача на одну секцию ударных элементов щетки в продольном направлении, мм; z – число секций ударных элементов щетки; v – скорость обработки, м/с; d – наружный диаметр щетки, мм; n – частота вращения, мин⁻¹.

Большой износостойкостью обладают ударные элементы из сталей 65Г и 20Х по сравнению с ударными элементами, изготовленными из стали 45. Для ударных элементов, изготовленных из прядей стальных канатов, скрепленных сваркой, расплавом металла и другими способами, используют канаты как с металлическим, так и с органическим сердечником. Предпочтительнее использовать канаты с металлическим сердечником, так как их обезжиривание и очистка от антикоррозионного покрытия менее трудоемки. Материал проволоки стальных канатов выбирать высшей В или первой марки (группы), обладающих лучшими механическими свойствами. Направление свивки не влияет на долговечность ударных элементов.

Ударные элементы в виде шайб и звездочек изготавливают из легированной конструкционной стали 20Х, обладающей после соответствующей термообработки хорошей износостойкостью при достаточно прочной и вязкой сердцеvine. Сталь 20Х цементируют на глубину 30–40% общей толщины материала с последующей закалкой и отпуском, что обеспечивает следующие механические свойства материала: $\sigma_b \geq 850$ МПа; $\sigma_t \geq 630$ МПа и $\sigma_{-1} \geq 590$ МПа. Рабочая поверхность имеет твердость 57–63 HRC, а сердцеvина до 212 НВ.

Существенное влияние на долговечность щетки оказывает скорость обработки, которую можно варьировать за счет частоты вращения инструмента, внешнего диаметра щетки, а также направления движения и частоты вращения обрабатываемого изделия.

Оптимальная скорость проволочных элементов для различных типов щеток различна и зависит от их назначения: жесткие щетки (иглофрезы) работают при скорости до 10 м/с, щетки с ударными элементами – до 20 м/с, секционные – до 32 м/с, в режиме зачистки – до 40 м/с и в режиме полирования – до 45 м/с и выше.

Рекомендации по обработке поверхностей щетками

1. Для интенсификации процесса обработки щетками следует увеличить: частоту вращения щетки, скорость обработки, натяг, жесткость проволочных элементов, плотность набивки ворса, массу ударных элементов, использовать более мощные щетки, пригодные для выполнения тяжелых режимов работы.