

М. В. КАСЬЯН, Г. А. АРУТЮНЯН, Г. Б. БАГДАСАРЯН

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Исследованиями [1, 2, 3 и др.] подтверждается важность технологической наследственности при формировании эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин. Упрочнение поверхностного слоя, которое возникает при предыдущей операции механической обработки, обычно распространяется глубже слоя металла, предназначенного для удаления на финишных операциях. В результате значительная часть упрочнения после финишной операции остается, что создает взаимодействие предыдущего и вновь образованного наклепов, часто приводящее к появлению микротрещин в поверхностном слое.

Физико-механические свойства рабочего поверхностного слоя после термической обработки, в частности, закалки, также обуславливаются степенью и глубиной упрочнения поверхности, образованной при предыдущей механической обработке. Это значит, что механическая обработка сырых деталей определяет свойства их рабочих поверхностей, получающихся в результате последующей закалки. Исследованием [3] установлено, что закалка деталей после их механической обработки приводит к возникновению за линией среза ослабленного слоя металла с пониженной твердостью, совпадающего с переходной зоной поверхности, где степень упрочнения, полученная при механической обработке, сравнительно невелика.

В связи с вышесказанным большой интерес представляет изучение показателей упрочнения поверхностного слоя при различных режимах резания у обрабатываемых сталей, значительно отличающихся друг от друга физико-механическими свойствами.

В статье приводятся результаты экспериментального исследования этого вопроса, с учетом его актуальности с позиций технологической наследственности.

В качестве обрабатываемых металлов были использованы железо-Армко, сталь СТЗ, сталь 45, 40Х и У8А.

Неизменными оставались геометрические параметры резца: передний угол $\gamma = +10^\circ$, главный угол в плане $\phi = 60^\circ$, вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 10^\circ$, задние углы $\alpha = \alpha_1 = 6^\circ$, угол наклона $\lambda = 0$, радиусы закрепления и округления $R = r = 0,03$ мм.

Параметры режимного поля при строгании колебались в следующих пределах для всех обрабатываемых металлов: скорость резания V от

3 до 47 м/мин, подача s от 0,25 до 3,0 мм/дв.х., глубина резания t от 0,5 до 3,5 мм. Выбор зоны небольших значений скорости резания диктовался необходимостью получить большие степени упрочнения металла за линией среза для более наглядного представления картины упрочнения, без заметного влияния температуры. Фиксировались в процесс резания и в результате последующих исследований следующие показатели: составляющие силы резания P_x , P_y , P_z , усадка продольная ζ , микротвердость прирезового слоя стружки H_c и поверхности H , глубина упрочнения h , изменение плотности дислокаций поверхности ρ . Плотность дислокаций определялась рентгенографическим методом, по расширению интерференционных линий на рентгенограммах [4].

Ниже приводятся исходные данные, характеризующие механические свойства избранных для исследования металлов (табл. 1).

Таблица 1

Обрабатываемый металл	Механические свойства при комнатной температуре					
	предел прочности σ_B , кг/мм ²	предел текучести σ_T , кг/мм ²	исходная микротвердость электр. полированных образц., кг/мм ²	относительн. удлинение при разрыве δ_s , %	относительное сужение при разрыве ψ , %	ударная вязкость кгм/см ²
Железо Армко	32	—	95	50	65	—
Сталь СТЗ	38—40	24	107	27	52	—
Сталь У8А	78	—	187	—	50	—
Сталь 45	64	36	203	17	40	8
Сталь 40Х	100	85	217	10	45	6

В табл. 2 приводятся данные, характеризующие силы, возникающие при резании различных металлов при изменении скорости резания ($s = 0,5$ мм/дв.х., $t = 1,0$ мм).

Таблица 2

Обрабатываемый металл	Скорость резания V , м/мин					
	3	12	20	24	36	47
	силы резания, кг					
	P_z P_y P_x	P_z P_y P_x	P_z P_y P_x	P_z P_y P_x	P_z P_y P_x	P_z P_y P_x
Железо Армко	165 90 68	159 92 65	180 114 78	195 136 88	204 151 99	180 140 88
Сталь СТЗ	155 74 61	147 74 55	163 88 61	182 118 75	192 129 83	178 119 77
Сталь 45	131 152 32	125 56 37	145 76 44	156 84 49	169 95 61	158 83 46
Сталь У8А	135 60 38	132 65 42	155 85 51	162 95 55	172 109 61	162 95 51
Сталь 40Х	133 54 34	129 60 39	149 80 48	155 88 51	168 102 62	155 83 48

Приведенное сопоставление позволяет прежде всего обратить внимание на то, что если предел прочности железа Армко в три с лишним раза меньше предела прочности стали 40Х, то тангенциальная составляющая силы резания, осуществляемого при тех же параметрах реза-

ния, на 30% больше того же показателя стали 40X. Почти то же самое можно сказать при сопоставлении показателей стали СТЗ и стали 40X. В какой-то степени повторяется эта картина в отношении осевых и радиальных составляющих силы резания. Очевидно, ведущим фактором, приводящим к этому явлению, нужно признать характеристику деформации. Приведем показатели деформации срезаемой стружки в продольном направлении (табл. 3).

Таблица 3

Обрабатываемый металл	Скорость резания V, м/мин					
	3	12	20	24	36	47
	продольная усадка стружки					
Железо Армко	6,2	6,0	5,6	5,0	4,6	4,6
Сталь СТЗ	5,0	4,8	4,5	4,4	3,8	3,7
Сталь У8А	2,6	2,2	1,8	2,0	2,0	2,0
Сталь 45	2,2	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0
Сталь 40X	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7

Очевидно, должна быть также связь между силой резания и характеристикой деформации слоя обработанной поверхности, причем эта связь может быть и для степени деформации и для глубины распространения этой деформации. Конечно, степень деформации—упрочнения заметным образом зависит от модуля Юнга, характеристики плотности дислокаций и метода нагружения, влияющего на температуру зоны деформации.

В связи с этим в табл. 4 представим данные микротвердости прирезцового слоя стружки, обработанной поверхности и глубины проникновения упрочнения.

Таблица 4

Обрабатываемый металл	Скорость резания V, м/мин																	
	3			12			20			24			36			47		
	Микротвердость прирезцового слоя стружки и обработанной поверхности (H _c , H, кг/мм ²) и глубина упрочнения h (мкм)																	
	H _c	H	h	H _c	H	h	H _c	H	h	H _c	H	h	H _c	H	h	H _c	H	h
Железо Армко	267	220	610	250	228	620	239	240	645	236	259	670	231	270	680	231	265	660
Сталь СТЗ		220	450		225	455		250	470		260	518		268	530		260	520
Сталь У8А	310	300	130	300	316	155	292	332	168	325	349	190	330	350	205	346	350	190
Сталь 45		290	127		295	135		324	160		330	165		340	180		322	160
Сталь 40Х		280	40		290	46		310	60		320	66		336	93		332	65

Из таблицы видно, что глубина упрочнения за линией среза у стали СТЗ, в особенности у железа Армко, почти в 10 раз больше, чем у сталей более твердых.

Данные, приведенные в табл. 3 и 4, показывают идентичность изменения продольной усадки стружки и средней величины микротвердости прирезцового слоя стружки (для железа Армко и стали У8А), что утверждает доминирующую роль деформации в зоне резания и в характере упрочнения стружки.

Несколько иначе обстоит вопрос о степени упрочнения. В табл. 5 приведены степени упрочнения исследуемых металлов в зависимости от скорости резания.

Таблица 5

Обрабатываемый металл	Скорость резания V , м/мин					
	3	12	20	24	36	47
	степень упрочнения					
Железо Армко	2,32	2,4	2,53	2,74	2,84	2,8
Сталь СТЗ	2,1	2,14	2,37	2,48	2,56	2,48
Сталь У8А	1,6	1,67	1,78	1,81	1,87	1,87
Сталь 45	1,4	1,45	1,6	1,62	1,8	1,58
Сталь 40Х	1,3	1,33	1,43	1,48	1,54	1,49

Приведенные данные говорят о том, что степень упрочнения обусловливается исходной твердостью металла: с увеличением пластичности степень упрочнения значительно растет. Это говорит о том, что при выборе режимов резания, в частности, скорости резания, нужно принимать конкретные меры, если вопросы деформации поверхностного слоя интересуют технолога и конструктора. Поскольку элементы сечения среза—подача и глубина резания могут сильно влиять также на исследуемые параметры, то их целесообразно рассмотреть. В табл. 6 и 7 приводятся значения тангенциальной силы резания P_z и показателей упрочнения H и h в зависимости от изменения подачи и глубины резания.

Таблица 6

Обрабатываемый металл	П о д а ч а, мм/дв. х																	
	0,25			0,5			1,0			1,5			2,0			3,0		
	сила P_z (кг) и показатели упрочнения H и h (кг/мм ² ; мкм)																	
	P_z	H	h	P_z	H	h	P_z	H	h	P_z	H	h	P_z	H	h	P_z	H	h
Железо Армко	110	216	573	150	220	603	340	270	668	445	218	770	513	208	878	567	205	930
Сталь СТЗ	100	216	409	140	222	438	300	270	548	405	225	660	473	218	718	527	212	758
Сталь У8А	89	282	101	125	290	127	230	338	190	311	298	260	351	290	304	405	287	325
Сталь 45	80	268	98	122	280	121	210	332	168	284	303	216	338	290	237	388	287	255
Сталь 40Х	85	268	23	122	276	33	216	320	66	297	268	103	351	260	110	391	253	114

$V=8$ м/мин, $t=1,0$ мм

Обрабатываемый металл	Г л у б и н а р е з а н и я t, мм																																			
	0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,5																				
	сила P _z (кг) и показатели упрочнения H и h (кг/мм ² ; мкм)																																			
	P _z			H			h			P _z			H			h			P _z			H			h			P _z			H			h		
	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h	P _z	H	h						
Железо Армко	83	210	580	112	216	590	150	220	605	185	223	618	224	230	639	258	233	67																		
Сталь СТЗ	74	212	393	101	216	426	42	216	439	176	223	451	203	225	463	243	228	49																		
Сталь У8А	63	273	106	89	282	114	115	287	126	158	294	143	180	300	168	210	305	19																		
Сталь 45	46	268	67	84	270	95	102	278	108	139	283	120	165	287	131	178	298	13																		
Сталь 40X	56	260	27	86	268	33	106	273	40	150	283	50	175	288	58	188	295	6																		

$V=8$ м/мин, $S=0,25$ мм/дв. х

Так как с увеличением подачи при обработке более пластичных металлов продольная усадка стружки значительно уменьшается (у ж. Армко от 6,6 при $s = 0,25$ мм/дв.х. до 4,6 при $s = 3,0$ мм/дв.х.), а при обработке более твердых металлов эта закономерность отсутствует (у сталей 45 и 40X продольная усадка при $s = 0,25$ мм/дв.х. соответственно равна 2,0 и 1,9, а при $s = 3,0$ мм/дв.х. — 1,8 и 1,8), надо было ожидать, что сила P_z при обработке железа Армко и стали СТЗ должна была возрастать менее интенсивно при увеличении подачи, чем при обработке более твердых металлов (сталь 45, сталь 40X). А между тем, как видно из табл. 6, при обработке железа Армко при увеличении $s = 0,25$ до 3,0 мм/дв.х. сила P_z увеличивается в 5,2 раза, а при обработке стали 40X — в 4,6 раза. Глубина упрочнения за линией среза, наоборот, при обработке более твердых металлов с увеличением подачи возрастает в 3—4 раза, а при обработке железа Армко и стали СТЗ — 1,6 раза. По-видимому, здесь сказывается влияние следующих противоположных факторов. С одной стороны, с увеличением пластичности обрабатываемых металлов вследствие увеличения коэффициента упрочнения металла в зоне резания уменьшается угол сдвига, что является причиной роста сил резания, несмотря на сравнительно невысокое значение напряжения сдвига в зоне стружкообразования. С другой стороны, повышение твердости и прочности обрабатываемого металла приводит к увеличению угла сдвига, являющегося причиной уменьшения сил резания и показателей упрочнения, и возрастанию напряжений сдвига в зоне стружкообразования и на задней грани резца. Последнее обстоятельство и является причиной роста сил резания и глубины упрочнения h при обработке более твердых металлов.

Как известно, при изменении глубины резания продольная усадка стружки не меняется заметным образом. Однако, как показывает табл. 7, с увеличением твердости и прочности обрабатываемых металлов особенно сильно возрастает глубина упрочнения за линией среза.

Видимо, это связано с ростом сил на задней поверхности резца в общем балансе сил при увеличении глубины резания.

Обратимся еще к одному показателю, характеризующему показатели пластической деформации в зоне резания: изменение плотности дислокаций ρ в зависимости от режимов резания v , s , t при обработке железа Армко и стали У8А.

Полученные экспериментальные данные сведены в табл. 8.

Таблица 8

	V	$\rho \cdot 10^{10}$	S	$\rho \cdot 10^{10}$	t	$\rho \cdot 10^{10}$		V	$\rho \cdot 10^{10}$
	м/мин	см ⁻²	мм/дв. х.	см ⁻²	мм	см ⁻²		м/мин	см ⁻²
Железо Армко	3	6,4	0,25	6,0	0,5	5,7	Сталь У8А	3	13
	12	6,2	0,5	6,0	1,0	6,0		12	13
	20	7,0	1,0	9,0	1,5	5,6		20	14,8
	24	7,3	1,5	7,0	2,0	7,9		24	15,5
	36	7,5	2,0	6,5	2,5	7,0		36	16,4
	47	—	3,0	6,3	3,5	7,3		47	15

Эти данные показывают, что при переходе от $v = 12$ к $v = 20$ мм/мин заметен скачок плотности дислокаций, а при последующем увеличении скорости, в пределах исследованных, увеличение ρ протекает без заметных скачков. Картина в значительной степени меняется при рассмотрении плотности дислокаций с увеличением подачи. При значении $S = 1,0$ мм/дв.х. (железо Армко) плотность дислокаций резко возрастает. При последующем увеличении подачи плотность снижается.

Таким же образом изменяется микротвердость обработанной поверхности (табл. 6), что характеризует доминирующую роль скопленных дислокаций в увеличении микротвердости металла [4]. При увеличении глубины резания плотность дислокаций умеренно возрастает, не отличаясь от характера изменения микротвердости обработанной поверхности (табл. 7).

Характерно, что при обработке более твердой стали—стали У8А значения плотности дислокаций при изменении скорости резания значительно выше, чем при обработке ж. Армко. Это также свидетельствует о связи микротвердости с плотностью дислокаций.

Нами определена также плотность дислокаций в зоне сдвига, в зависимости от скорости резания, при обработке железа Армко и стали У8А.

Для этого мы пользовались зависимостью, данной в [5]:

$$\tau = \frac{Gb \sqrt{\rho}}{2\pi} \quad (1)$$

Эта зависимость справедлива при параболической стадии упрочнения и наблюдается для поликристаллических металлов. Из (1) плотность дислокаций равна:

$$\rho = \frac{4\tau^2 \pi^2}{G^2 b^2} \quad (2)$$

где τ — критическое течение или критическое напряжение сдвига,
 G — модуль сдвига ($G = 8 \cdot 10^3$ кг/см²),
 b — вектор Бюргерса ($b = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см).

Значения τ известны из наших расчетов для исследуемых значений скорости резания и приведены в [6].

Данные расчета плотности дислокаций в зоне сдвига представлены в табл. 9.

Таблица 9

Обрабатываемый металл	Скорость резания V , м/мин							
	3		10		20		36	
	Значения τ (кг/мм ²) и ρ (см ⁻²)							
	τ	$\rho \cdot 10^{11}$	τ	$\rho \cdot 10^{11}$	τ	$\rho \cdot 10^{11}$	τ	$\rho \cdot 10^{11}$
Железо Армко	28,5	8,1	28,4	8,0	27,4	7,3	28,1	7,9
Сталь У3А	42,7	18	43,5	19	45,5	21	48,5	24

Как показывает таблица, в зоне сдвига плотность дислокаций в 10—10² раза выше, чем за линией среза, что вполне убедительно, поскольку деформация в локализованной области сдвига обычно очень высокая. Следует отметить, что параболическая связь наблюдается также между плотностью дислокаций и микротвердостью обработанной поверхности, полученных нами экспериментальным путем [4]. Таким образом, технологу надо знать, как режимы резания оказывают влияние на упрочнение рабочей поверхности деталей машин из различных металлов, значительно отличающихся физико-механическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Ящерицын. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении. Минск, 1974.
2. А. А. Маталин. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. «Вестник машиностроения», 1968, № 1.
3. Г. К. Маркарян. Технологическая наследственность при образовании поверхности закаленных деталей. Физика резания металлов, вып. 1. Ереван, 1971.
4. Г. А. Арутюнян. О физической сущности упрочнения металла за линией среза. Физика резания металлов, вып. 2. Ереван, 1973.
5. «Физическое металловедение». Пер. с англ., вып. 3, М., 1968, стр. 174.
6. Г. А. Арутюнян, Г. Б. Багдасарян. Влияние скорости деформации на усадку снимаемого слоя при строгании. Сборник научных трудов ЕрПИ, т. 24, Ереван, 1972.