



The chemical and phase composition of steel and cast iron chips is studied, quantitative content of phases, including ferric oxides and other chemical elements chips, is determined.

О. М. ДЬЯКОНОВ, БНТУ

УДК 669.054.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНОЙ И ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ

Рациональное построение технологических процессов переработки металлоотходов невозможно без знания истории их образования, химического состава, физико-химических и механических свойств. В настоящей работе в качестве исследуемых материалов выбраны стальная и чугунная стружка, образующаяся при механической обработке заготовок деталей машин.

Особенности формирования структуры и свойств материала стружки. Материал стружки в процессе резания подвергается значительной пластической деформации и упрочнению. Пластичные металлы подвергаются большему упрочнению, чем твердые или хрупкие. Чем больше степень пластической деформации, тем больше упрочнение. Материал стружки имеет многочисленные дефекты кристаллического строения, характерные для состояния наклепа. По характеру строения и свойствам он резко отличается от материала обрабатываемой заготовки.

Механическая работа, затрачиваемая на процесс резания, превращается в тепловую энергию. В зависимости от режима резания и условий обработки стружкой отводится 25–85% всей выделяющейся теплоты. При увеличении скорости резания количество теплоты, отводимое стружкой, повышается.

Нагрев стружки сопровождается процессами разупрочнения и окисления металла. Возможны фазовые превращения, в частности аустенитно-мартенситное превращение при закалке стальной стружки на воздухе. Эти процессы интенсифицируются в условиях сухого и полусухого трения, при уменьшении толщины срезаемого слоя металла (толщины стружки) и увеличении скорости резания.

Окисленность стружки оказывает большое влияние на процесс ее дальнейшей переработки.

Оксиды могут образовываться как в процессе образования стружки, так и при ее хранении и переработке. Кристаллическая решетка металла стружки, особенно у ее поверхности, находится в структурно-неравновесном состоянии, имеет меньшую энергию активации процессов диффузии и самодиффузии атомов и вследствие этого обладает более низкой коррозионной стойкостью. Частицы стружки обладают большой активной поверхностью, в 5–6 раз превышающей поверхность материала заготовки того же объема за счет шероховатостей, макро- и микроскопических трещин.

В состав стружковых отходов, помимо металлической составляющей, входят смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), оказывающие значительное влияние на физико-химические и технологические свойства данного вида материала. К наиболее употребляемым СОТС относятся смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ): водные растворы минеральных электролитов, эмульсии, растворы мыл, минеральные, животные и растительные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы), керосин и растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) в керосине, масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ (графита, парафина, воска и др.). Современные эмульсионные СОЖ являются сложными системами, включающими антифрикционные и противозадирные присадки, ингибиторы коррозии (нитрит натрия и др.), эмульгаторы, способствующие длительному хранению эмульсии и предотвращающие ее разделение на воду и масло (желатин), бактерицидные добавки и т. д. Оптимальная концентрация водной СОЖ зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, осуществляемой операции, режимов обработки и колеблется от 1 до 10%.

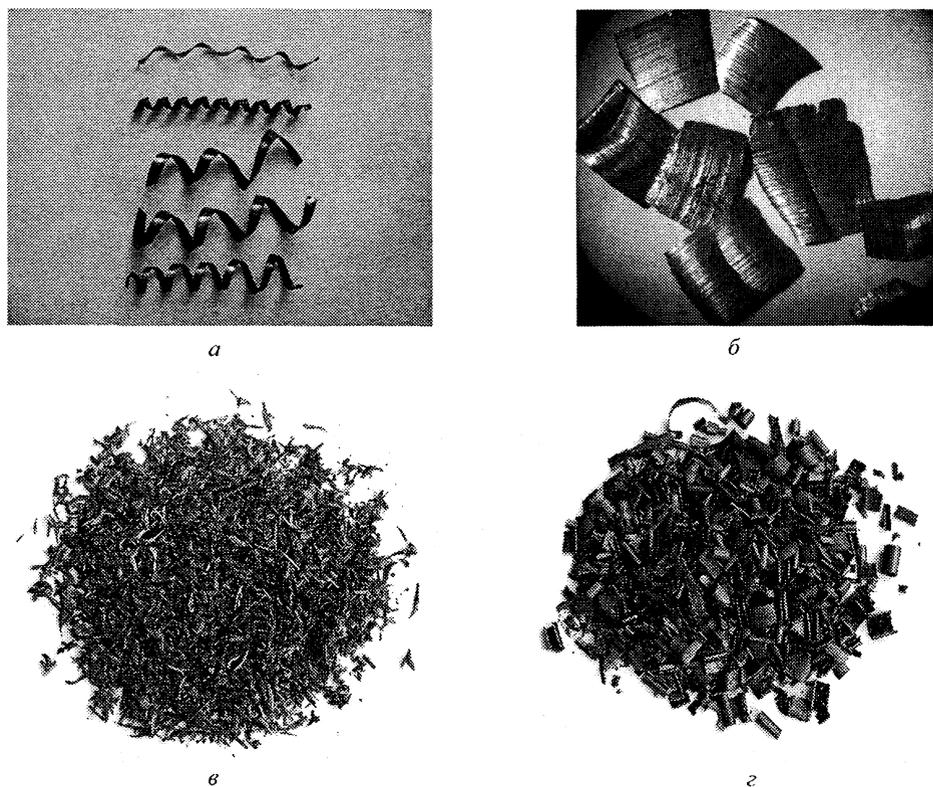


Рис. 1. Внешний вид исследуемых образцов стружки: *а* – токарная сливная стружка (сталь СтЗкп, сталь 45); *б* – фрезерная стружка скалывания (сталь ШХ15); *в* – фрезерная стружка надлома (сталь Р6М5); *г* – токарная стружка надлома (серый чугун СЧ25)

В процессе механической обработки заготовки СОЖ отводят теплоту во внешнюю среду, охлаждая стружку. Затормаживаются, а в ряде случаев предотвращаются процессы разупрочнения и окисления металла, а также фазовые превращения. Молекулы жидкостей и в особенности ПАВ адсорбируются на поверхностях микротрещин стружки.

Водные СОЖ широко применяются при черновой и получистовой обработке, при большой толщине срезаемого слоя металла (большой толщине стружки), когда необходимо сильное охлаждающее действие жидкости. Они подразделяются на синтетические жидкости – водные растворы солей и ПАВ и эмульсии. Эмульсии являются дисперсными системами, состоящими из двух жидкостей – воды и масла, нерастворимых друг в друге. Основой эмульсии служит вода, в которой в виде микрокапель (1–30 мкм) распределено масло. Микрокапли масла в системе стабилизированы ПАВ. ПАВ повышают смачивающие свойства жидкости.

При чистовой обработке и соответственно малой толщине срезаемого слоя металла (малой толщине стружки) широко используют различные масла. Для активизации смазок к ним добавляют активные вещества – фосфор, серу, хлор. Под влиянием высоких температур и давлений в про-

цессе резания эти вещества образуют с металлом стружки соединения, снижающие трение – фосфиды, сульфиды, хлориды. В масляных СОЖ в качестве масляной фазы используют в основном минеральные и растительные масла или их смеси с антифрикционными, противокоррозионными и противозадирными присадками. К этой группе СОЖ относятся керосин, дизельное топливо и его смеси с различными маслами и сульфозфрезолом. Широкое распространение получили СОЖ на основе эмульсий второго рода, представляющих собой стабильную тонкую дисперсию воды в масле (до 70% воды). В качестве эмульгаторов используются маслорастворимые ПАВ.

Масляные СОЖ обладают высокими смазывающими, смачивающими и пропитывающими свойствами вследствие низкого поверхностного натяжения. Они хорошо защищают поверхность режущего инструмента от прихвата с обрабатываемым материалом, уменьшают силы резания и тепловыделение.

Образцы стружки, принятые для анализа. В качестве исследуемых образцов стружки выбраны токарная сливная стружка низкоуглеродистой стали СтЗкп и среднеуглеродистой стали 45 (рис. 1, *а*), фрезерная стружка скалывания подшипниковой стали ШХ15 (рис. 1, *б*), фрезерная стружка надлома быстрорежущей стали Р6М5 (рис. 1, *в*),

токарная стружка надлома серого чугуна СЧ25 (рис. 1, з).

Химический состав. Усредненный химический состав стружки различных производств с указанием применяемой СОЖ приведен в табл. 1, химический состав металлической составляющей стружки в сравнении с химическим составом обрабатываемой заготовки (ГОСТ) – в табл. 2. Для исследования химического состава использовали методики по ГОСТ 22536.1-88, 18897-98 (ИСО 4491-2-97), 16412-91.

Как видно из табл. 2, химический состав металлической составляющей стружки в основном соответствует химическому составу материала обрабатываемой заготовки. Различие состоит в содержании кислорода, которое у стальной стружки находится в пределах 1–2%, у чугунной – до 0,5%.

Наименее окислена стружка сталей ШХ15 и Р6М5 на масляной СОЖ. Масло с маслорастворимым ПАВ (Сунгрин-600, МР-7) хорошо смачивает поверхность металлических частиц и создает на ней пленку, предохраняющую металл от окисления.

Содержание углерода также влияет на степень окисления. Наиболее окислена низкоуглеродистая стружка стали Ст3кп, в меньшей степени – стружка стали 45. Стружка серого чугуна СЧ25 содержит наименьшее количество оксидов. В чугуне в основном окисляется металлическая матрица, содержащая включения графита.

В процессе резания при нагреве на воздухе углеродистая или легированная стальная стружка окисляется быстрее монолита обрабатываемой заготовки. Чем меньше размеры частиц стружки, тем выше скорость окисления. Чугунная стружка подвержена окислению в гораздо меньшей степени, что связано с равномерным распределением в объеме металла структурно свободного графита, который при резании предохраняет металл от окисления.

Для исследования фазового состава стружки использовали методики [1–3]. На рис. 2–5 показаны рентгенограммы проб стальной и чугунной стружки, в табл. 3 приведен идентифицированный их фазовый состав. Каждая проба состояла из отдельной отмытой от масла и СОЖ чешуйки стружки. Как видно из таблицы, в стружке углеродистых сталей наиболее интенсивно окисляются железо и углерод. Среди оксидов железа наибольшее процентное содержание приходится на долю закиси-окиси железа Fe_3O_4 (4,7%). Некоторое уменьшение содержания углерода в стружке обусловлено тем, что он, взаимодействуя с кислородом, образует оксид углерода СО. В стали ШХ15, кроме этих элементов, окисляется хром (Cr_2O_3 – 0,1%). Содержание марганца, серы и фосфора в материале стружки заметно не изменяется, уменьшение содержания кремния в пределах 1% также незначительно и не может оказать суще-

Таблица 1. Химический состав стружки

Материал стружки	Операция	СОЖ и ее состав	Содержание, %	
			металл	жидкая фаза
Сталь Ст3кп	Точение	СОЖ на основе олеата ТЭА	93,0–95,0	5,0–7,0
Сталь 45	Точение	Олеат ТЭА (водный раствор) – 0,5–0,75%, свободная олеиновая кислота – 1,5–2,5%	93,0–95,0	5,0–7,0
Сталь ШХ15	Точение, фрезерование	Масло МР7	93,0–95,0	5,0–7,0
Сталь Р6М5	Точение, фрезерование	Масло «Сунгрин-600»	91,0–92,0	8,0–9,0
Чугун СЧ25	Точение, фрезерование	Эмульсол ЭТ2 – 3,5–5,0%, сода кальцинированная – 0,2–0,3%, фурацилин – 0,04%, триэтанолламин – 0,5–1,0%, вода – остальное	88,0–90,0	10,0–12,0

Таблица 2. Химический состав металлической составляющей стружки, %

Материал		C	Si	Mn	Cr	O	W	V	Co	Mo
Сталь Ст3кп	ГОСТ 380-71	0,14–0,22	0,07	0,30–0,60	0,3	–	–	–	–	–
	Стружка	0,15	0,05	0,30	0,1	2,0				
Сталь 45	ГОСТ 1050-74	0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25	–	–	–	–	–
	Стружка	0,45	0,31	0,78	0,15	1,73				
Сталь ШХ15	ГОСТ 801-78	0,95–1,05	0,17–0,37	0,20–0,40	1,30–1,65	–	–	–	–	–
	Стружка	1,08	0,26	0,30	1,42	1,64				
Сталь Р6М5	ГОСТ 19265-73	0,84–0,92	0,50	0,50	3,80–4,30	–	5,70–6,70	1,70–2,10	4,70–5,20	4,80–5,30
	Стружка	0,93	0,25	0,21	4,25	1,12	5,98	1,96	5,0	5,19
Чугун СЧ25	ГОСТ 1412-85	3,20–3,40	1,40–2,20	0,70–1,0	–	–	–	–	–	–
	Стружка	2,58	1,86	0,73	–	0,46	–	–	–	–

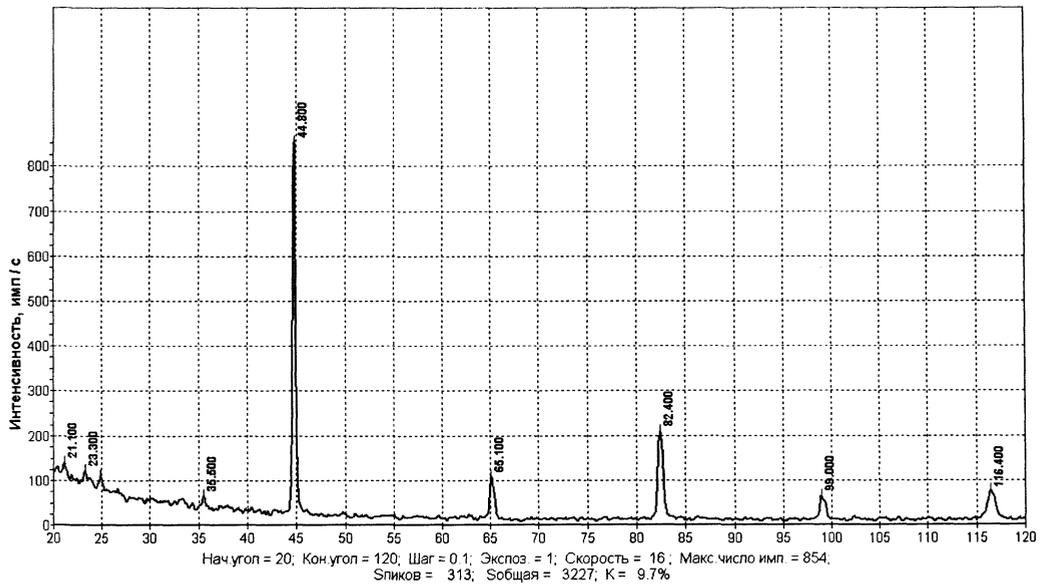


Рис. 2. Рентгенограмма стружки стали 45

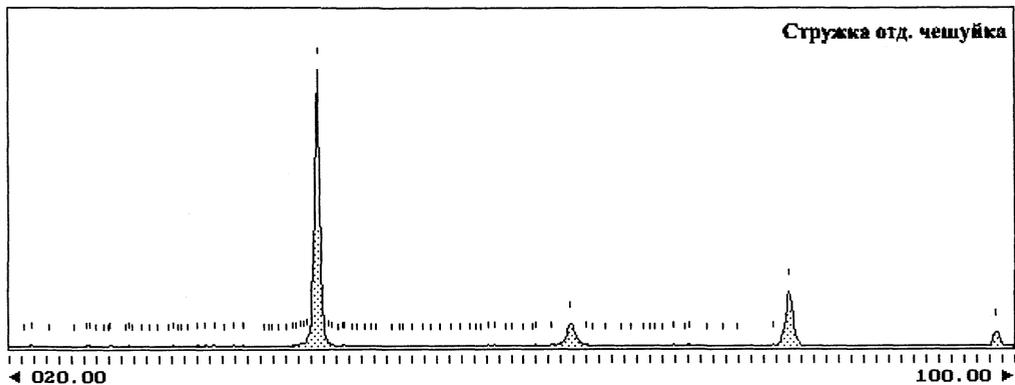


Рис. 3. Рентгенограмма стружки стали ШХ15

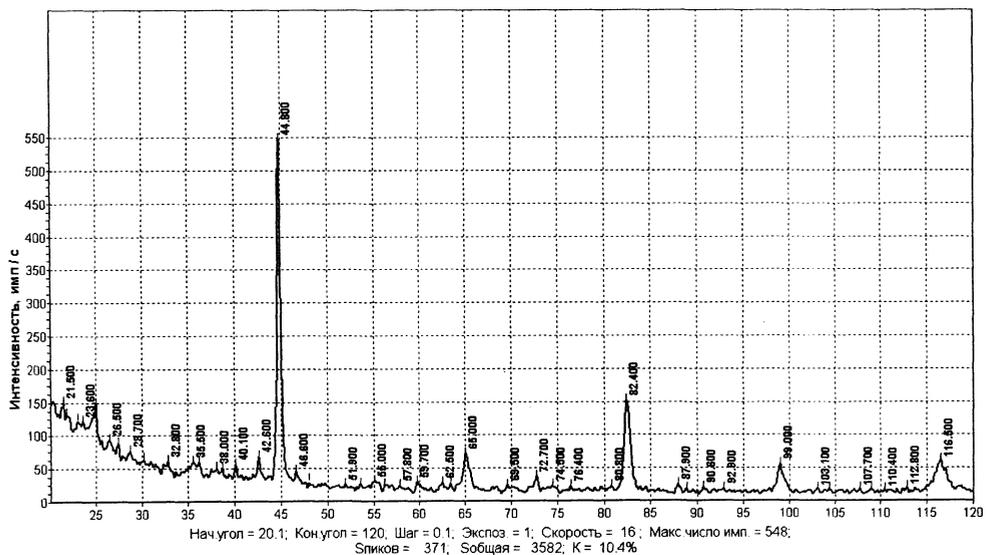


Рис. 4. Рентгенограмма стружки стали P6M5

ственного влияния на металлургическую ценность стружки.

Единственным оксидом, образующимся при выдержке хрома в кислороде, является Cr_2O_3 [4, 5]. Его линии получают четкими, если он образу-

ется при температуре более $600\text{ }^\circ\text{C}$, и размытыми – при более низких температурах (по рентгенограммам). Скорость окисления хрома на воздухе меньше, чем в чистом кислороде. Добавки металлов с валентностью более 3 повышают скорость

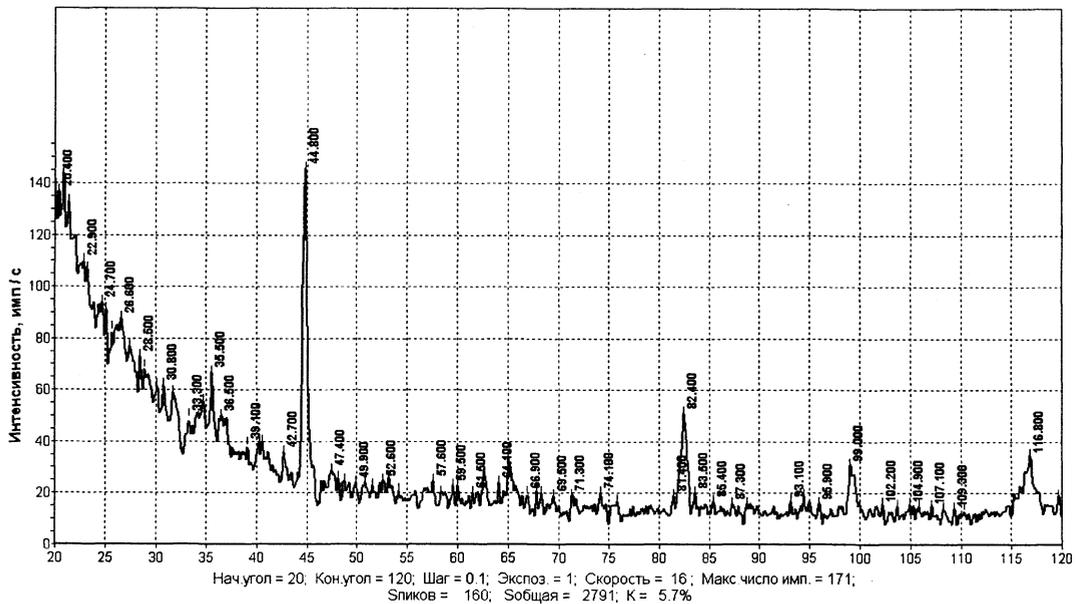


Рис. 5. Рентгенограмма стружки серого чугуна СЧ25

Таблица 3. Фазовый состав стружки

Материал	Фаза	Количественное содержание, %	Фаза	Количественное содержание, %
Сталь 45	α -Fe	Остальное	Fe_2O_3	3,3
	Fe_3O_4	4,7	FeO	2,1
Сталь ШХ15	Fe-Cr (α -твердый раствор)	93,1	Mn_3O_4	—
	Fe_3C	2,7	MnO	—
	Fe_2C	0,3	δ - MnO_2	0,4
	$Mn_{22,6}Si_{5,4}C_4$	0,1	Fe_2O_3	0,2
	Fe_8Si_2C	1,4	Cr_2O_3	0,1
	SiC	0,5	SiO_2	—
	Mn_2O_3	0,1	SiO	1,0
Сталь Р6М5	Fe (α -твердый раствор)	Остальное	Fe_3O_4	4,5
	WC	5,6	$Mo_{18}O_{52}$	3,2
	Fe_3W_3C	7,3	FeO	2,2
	Cr_2O_3	5,3		
Серый чугун СЧ25	Fe (α -твердый раствор)	Остальное	$C_{0,055}Fe_{1,945}$	5,1
	Fe_3O_4	4,6	FeO	3,1
	C	2,4	Si	0,9

окисления хрома. Углерод также способен повысить скорость окисления хрома.

В стружке стали Р6М5 наиболее окислены железо, молибден и хром. Согласно [5], молибден сохраняет свой блеск после двухчасовой выдержки на воздухе при температуре до 200 °С, при 300 °С он тускнеет, приобретая синевато-стальной оттенок, а при температуре до 600 °С на нем образуется прочно сцепляющийся с металлом оксидный слой. При более высоких температурах наружный слой трехокси молибдена сначала кристаллизуется (MoO_3), а затем плавится и улетучивается, так что дальнейшее окисление протекает очень быстро с потерей массы образца. Обычно на молибдене образуются два оксидных слоя: наружный, состоящий из его трехокси, и прилегающий к металлу слой MoO_2 . Слой MoO_3 возгоняется при

температуре 560–620 °С. После этого с повышением температуры наблюдается катастрофическое окисление.

Вольфрам во многом окисляется подобно молибдену. При выдержке на воздухе при температуре до 300 °С вольфрам сохраняет свой блеск в течение более 2 ч [6]. По мере дальнейшего нагревания сначала появляются цвета побежалости, а затем при 600 °С образуется иссиня-черная оксидная пленка, сцепляющаяся с металлом. При еще более высоких температурах образуется желтый или желто-зеленый слой WO_3 с тенденцией к отслаиванию. Его пористость составляет около 30%. После окисления при 700–1000 °С под поверхностным слоем трехокси образуется тонкая сцепляющаяся с металлом черно-голубая пленка оксида предположительного состава WO_2 . Вслед-

ствии катастрофического окисления вольфрам и молибден являются самыми неподходящими компонентами сплавов.

В стали Р6М5 углерод повышает сопротивление железа окислению до тех пор, пока не происходит выделение СО. Для кремния авторы всех исследований сходятся в том, что он в повышенных концентрациях (3–10%) благотворно отражается на сопротивлении железа окислению при температуре до 1000 °С. Малые добавки кремния влияют на сопротивление окислению слабее. Кремний в сплаве окисляется на поверхности избирательно с образованием α -тридимита и α -кристаллита или их смеси. Одновременно образуются и оксиды железа. Найдена следующая последовательность оксидных слоев на сплаве с 1,4% кремния: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}+\text{Fe}_2\text{SiO}_4$.

Марганец в сталях оказывает очень малое влияние на их сопротивление окислению.

Небольшие добавки молибдена (2–3%) немного улучшают сопротивление железа окислению при 600–1000 °С вследствие образования у поверхности Fe_2MoO_4 . Увеличение количества добавки свыше 5% резко усиливает окисление сплава. Введение в такой сплав дополнительно вольфрама приводит к катастрофическому окислению или очень быстрому окислению, связанному с окислением металла на поверхности раздела сплав–оксид и межзеренным разьединением.

Ванадий не способен улучшить сопротивление сталей окислению. Образующаяся в процессе окисления пятиокись ванадия принадлежит к числу наиболее окисляемых соединений, вызывающих катастрофическое окисление при температуре ~1000 °С.

В присутствии водяных паров окисление этих элементов в сплавах железа возрастает вследствие образования гидроксидов.

Таким образом, анализ литературных данных, так же как и данных табл. 3, показывает, что стружка стали Р6М5 обладает высокой окисляемостью.

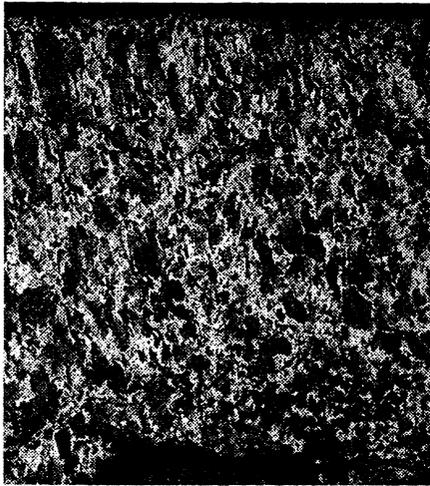
По данным К. И. Ващенко [7], графитовые включения в серых чугунах содержат 40,0–72,5% углерода, остальное – железо, кремний и марганец. В графите растворено 0,25–1,1% Fe и 0,3–0,4% Si. Размеры включений графита колеблются в пределах 0,001–1,0 мм, чаще они бывают размером 0,05–0,5 мм. Удельный вес графита 2,2 г/см³. В серых чугунах его включения не имеют правильной слоистой формы, так как в процессе образования графитовые пластины срастаются под разными углами.

В момент отделения элемента чугушной стружки от заготовки разрыв связей с основной массой

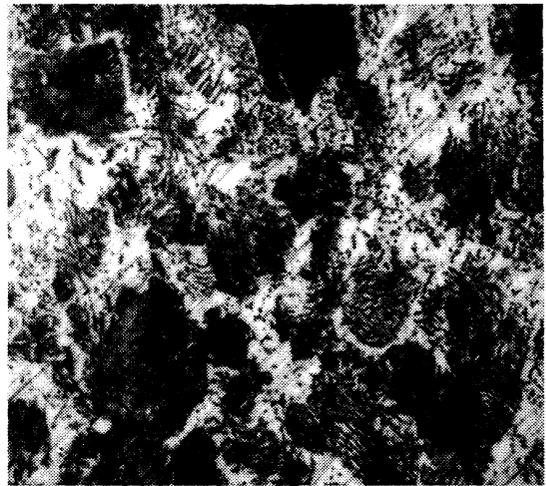
металла происходит в менее прочных местах, т. е. не по металлической матрице, а по сечению, имеющему наибольшую площадь графитовых включений. Поэтому на поверхности, в порах и трещинах чугушной стружки графитовых включений гораздо больше, чем на поверхности чугунного изделия. Этим объясняются потери графита в процессе образования, транспортировки и складирования стружки. При образовании стружки потери графита составляют: у чугунов с мелкопластинчатым графитом 0,8–1,6%, с крупнопластинчатым – до 3% от его массы. При транспортировке и перемешивании стружки часть графита, находящегося на поверхности элементов, выкрашивается, при этом, чем больше активная поверхность стружки, тем больше потери графита. У крупной стружки выкрашивается 2–4%, у мелкой – 4–12%. В чугушной пыли количество графита возрастает на 8–18%. При прочих равных условиях больше подвержены выкрашиванию крупнопластинчатые графитовые включения.

Таким образом, графит на активной поверхности элемента чугушной стружки занимает значительную площадь. При комнатных температурах он не способен вступать в реакцию с кислородом, однако окружающая матрица может окисляться (табл. 3). Образовавшиеся оксиды, как и матрица, находятся в теснейшем контакте с графитом как на поверхности, так и внутри стружки, ибо окислитель может проникнуть во внутрь стружки только в местах выхода графита на поверхность или по трещинам и щелям, стенки которых избилуют графитовыми включениями.

Микро- и макроструктура. Исследование микроструктуры стружки проводили на световом микроскопе MeF-3 фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении от 100 до 1250. Микроструктура стружки углеродистой стали 45, как и материал обрабатываемой заготовки, имеет феррито-перлитную основу (рис. 6). Стружка легированной хромом высокоуглеродистой стали ШХ15 имеет два типа структур (рис. 7): зернистый перлит (отожженное состояние) и мелкоигольчатый мартенсит с карбидами (закаленное состояние). Закалка протекает на воздухе в процессе образования стружки. Микроструктура стружки стали Р6М5 представляет собой карбиды и α -твердый раствор Fe (рис. 8). Микроструктура стружки серого чугуна СЧ25 состоит из α -твердого раствора Fe с включениями графита и цементита (рис. 9). В чугуне обнаружены шлаковые включения (темные вертикальные прослойки) и элементы отбеленного чугуна с участками ледебурита (светлые участки, рис. 10).

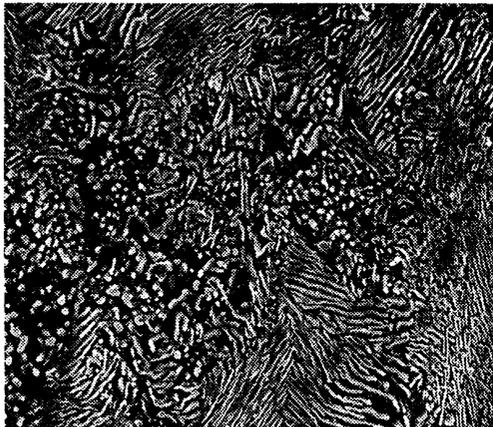


a

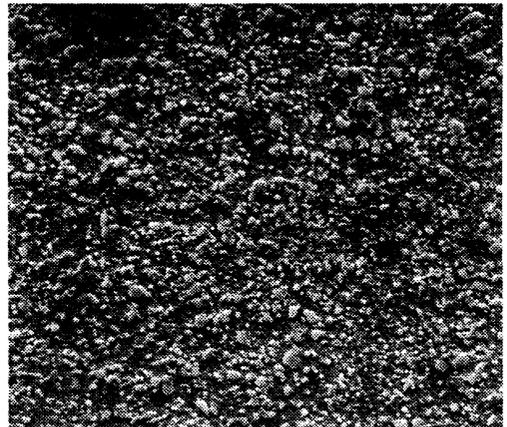


б

Рис. 6. Микроструктура стружки стали 45 (феррито-перлитная основа): *a* – $\times 200$; *б* – $\times 500$

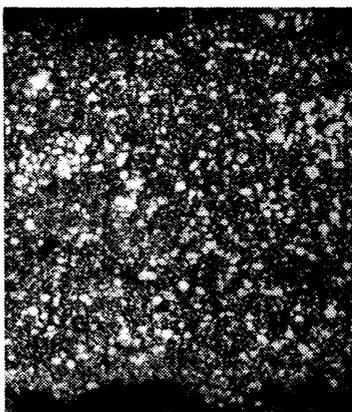


a

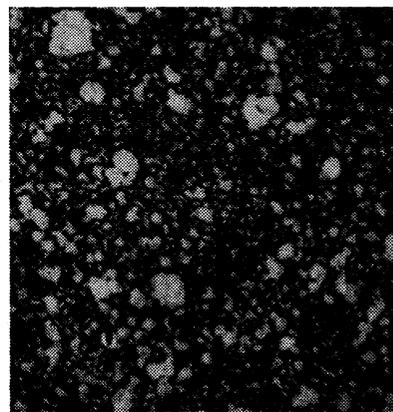


б

Рис. 7. Микроструктура стружки стали ШХ15: *a* – игольчатый мартенсит. $\times 1250$; *б* – карбидные включения. $\times 1000$



a



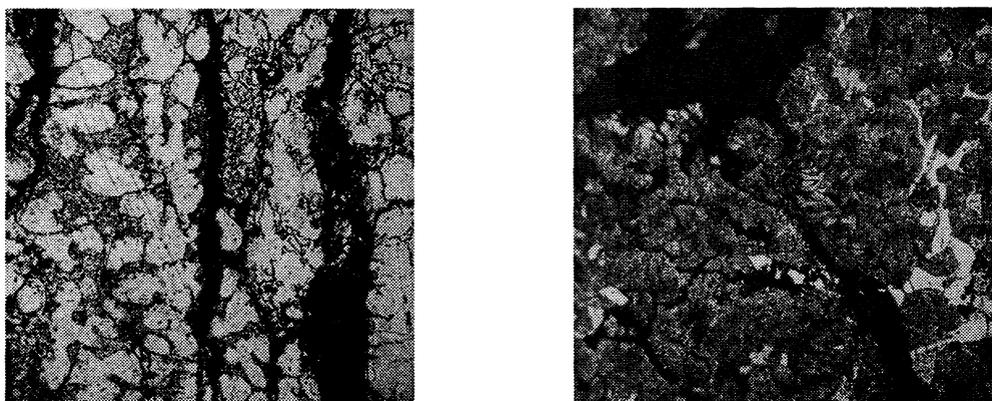
б

Рис. 8. Микроструктура стружки стали P6M5 (карбиды и α -твердый раствор Fe): *a* – $\times 500$; *б* – $\times 1250$

В макроструктуре стружки присутствует в большом количестве дефекты внутреннего и наружного строения в виде трещин и надрезов (рис. 11). Чугунная стружка, помимо этого, имеет каналы, которые образовались в процессе выкрашивания графита.

Основным методом исследования микроструктуры была выбрана сканирующая электронная

микроскопия [8, 9]. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе «Cam-Scan» («Oxford Instruments», Англия) с рентгеновским энергодисперсионным анализатором. Морфологию образцов стружки исследовали в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 10–20 кВ при различном увеличении: от 500 до 10 000 (рис. 12–16). Разре-



a

б

Рис. 9. Микроструктура стружки серого чугуна СЧ25: *a* – нетравленный (пластинчатый графит, шлаковые прослойки в сердцевине стружки); *б* – после травления (феррито-перлитная основа). *a, б* – $\times 200$



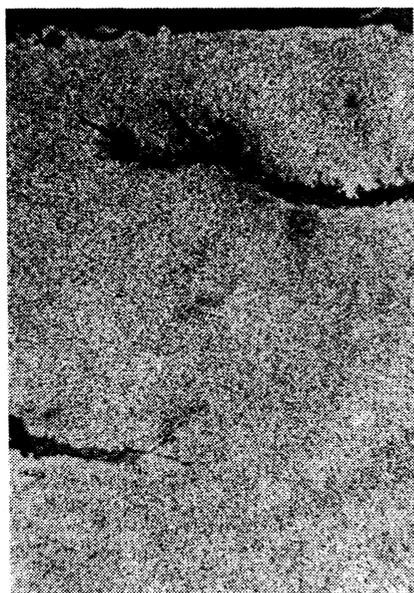
Рис. 10. Микроструктура стружки серого чугуна СЧ25 с элементами отбеленного чугуна (ледебурит). $\times 200$

шающая способность данного СЭМ составляет 70 \AA .

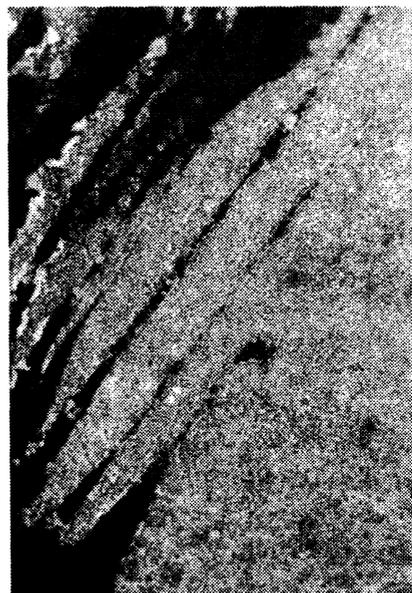
Применяли два типа исследований: спектр с поверхности шлифа и структура поверхности в сочетании с *У*-модуляцией, т. е. медленное ска-

нирование электронного пучка вдоль линии с регистрацией рентгеновского излучения по каждому химическому элементу и построением концентрационных кривых распределения (рис. 17–20). Таким образом, проводили точечный микрорентгеноспектральный количественный анализ содержания химических элементов по толщине стружки, где *L* – расстояние от края поверхности стружки до исследуемой точки спектра в направлении, перпендикулярном поверхности (табл. 4).

Электронное изображение микроструктуры стружки при увеличении 5000, 10000 позволяет получить более детальное представление о ее строении. Феррито-перлитная основа стружки стали 45 (см. рис. 13), так же как и серого чугуна СЧ 25 (см. рис. 16), содержит вытянутые пластинки цементита в перлите. Стружка стали ШХ15 имеет смешанную микроструктуру зернистого перлита и игольчатого мартенсита (см. рис. 14).



a



б

Рис. 11. Макроструктура стружки: *a* – внутренние; *б* – наружные дефекты. *a, б* – $\times 100$

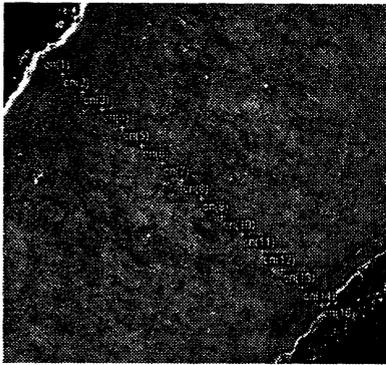
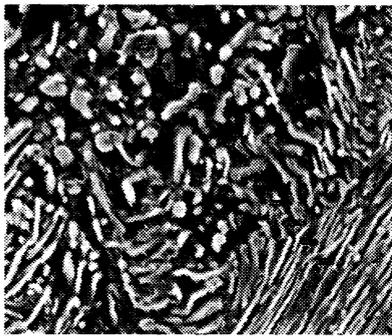


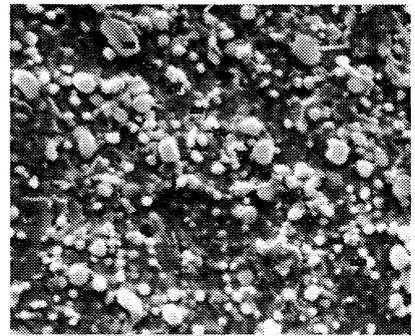
Рис. 12. Точечное обозначение исследуемых участков стружки по толщине. $\times 500$



Рис. 13. Микроструктура сердцевины стружки стали 45 с вытянутыми пластинками цементита в перлите. $\times 10000$



a



б

Рис. 14. Микроструктура сердцевины стружки стали ШХ15: *a* – смешанная структура зернистого перлита и игольчатого мартенсита; *б* – карбидные включения. $\times 5000$

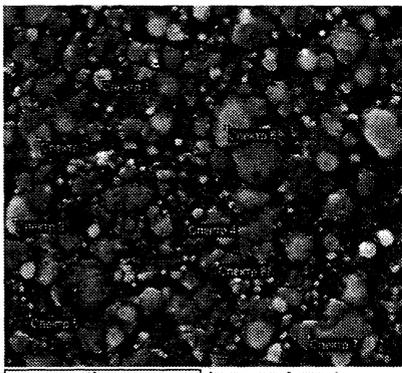


Рис 15. Микроструктура сердцевины стружки стали Р6М5. $\times 10000$

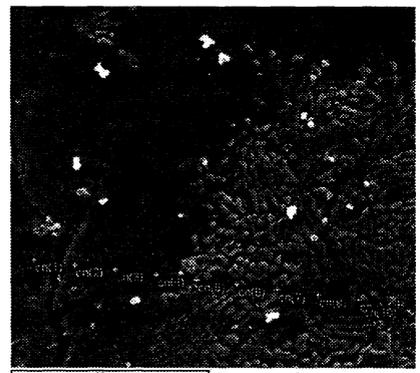


Рис 16. Микроструктура сердцевины стружки серого чугуна СЧ25 (феррито-перлитная основа с пластинками цементита в перлите). $\times 5000$

Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа химического состава стружки по толщине (табл. 4, рис. 17–20), стружка окисляется не только у ее поверхности, но и в глубине. Причиной этому, как уже отмечалось, являются многочисленные микро- и макротрещины.

Коррозионная стойкость. В работе [10] исследован процесс «мокрой» коррозии чугунной стружки и пластины на воздухе при комнатной температуре. Предварительно стружка и пластина смачивались в водоземulsionной СОЖ. При выдержке в течение 3 сут скорость коррозии стружки, размеры фракций которой изменялись

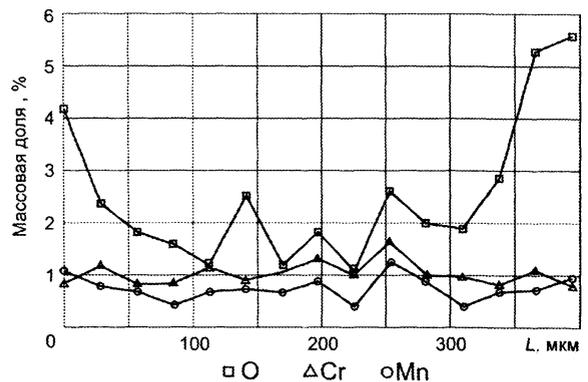


Рис. 17. Гистограмма распределения химических элементов стружки стали 45 по толщине

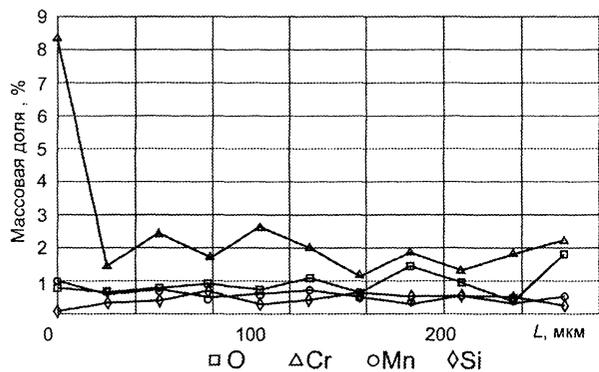


Рис. 18. Гистограмма распределения химических элементов стружки стали ШХ15 по толщине

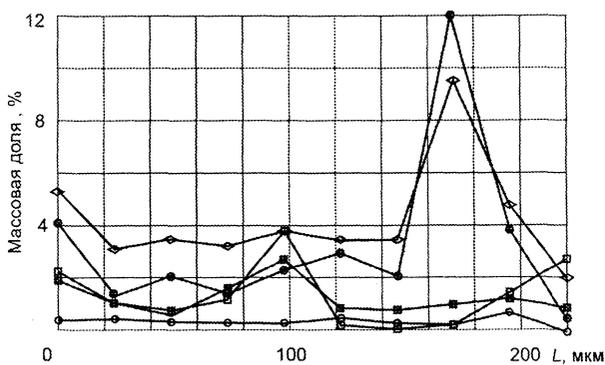


Рис. 19. Гистограмма распределения химических элементов стружки стали P6M5 по толщине

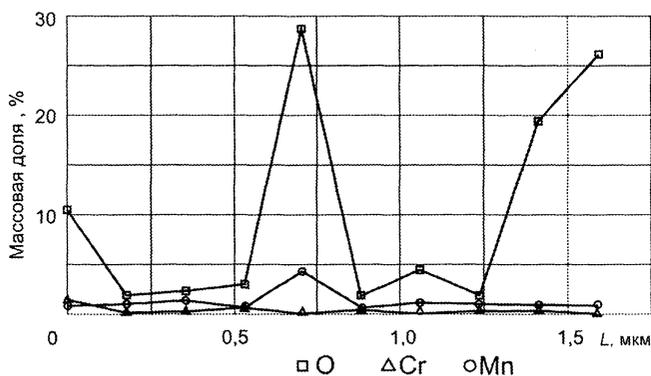


Рис. 20. Гистограмма распределения химических элементов стружки серого чугуна СЧ 25 по толщине

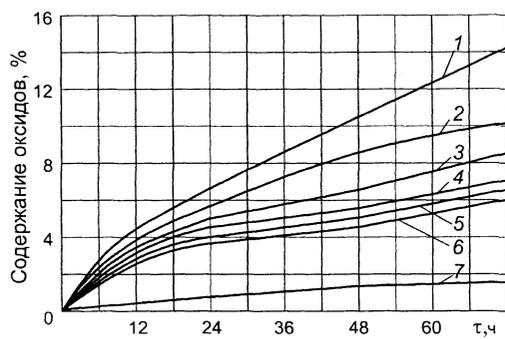


Рис. 21. Скорость атмосферной коррозии чугунной стружки. 1 – фракция менее 5 мм; 2 – 0,5–1,0; 3 – 1,0–1,5; 4 – 1,5–2,0; 5 – 3,0–4,0; 6 – 4,0–5,0; 7 – чугунная пластина

от 0,5 до 5,0 мм, оказалась в 4–8 раз больше, чем пластины (рис. 21). При уменьшении размеров фракций скорость коррозии последовательно увеличивалась. Это явление объясняется увеличением удельной поверхности стружки, а также развитием не только поверхностной, но и внутренней коррозии. Пары эмульсии проникают в поры и щели стружки, имеют отличную от эмульсии концентрацию и являются активным окислителем [11].

Аналогичное увеличение скорости окисления было обнаружено при исследовании процесса коррозии образцов стальной стружки. В отличие от водоэмульсионных СОЖ масло препятствует протеканию процессов коррозии.

Механические свойства. В табл. 5 приведены значения насыпной плотности стальной и чугунной стружки (ρ), средней микротвердости по толщине в поперечном сечении, условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и предела прочности (σ_b) в сравнении с механическими характеристиками обрабатываемой заготовки (ГОСТ). Измерение микротвердости проводили на микротвердомере «Migromet-II» с нагрузкой 100 г по ГОСТ 9450-76, испытания на растяжение – на универсальной испытательной машине «Instron 1195 (Англия)» в соответствии с ГОСТ 1497-84. Погрешность измере-

ния 1%. Образцы стружки имели вид прямоугольной пластины без наружных дефектов.

Насыпная плотность стружки (ρ), так же как и степень ее дисперсности, удельная поверхность, зависит от природы обрабатываемого материала, фракционного состава, формы и размеров металлических частиц.

Прочностные характеристики стальной стружки выше, чем у материала обрабатываемой заготовки. Повышенная микротвердость свидетельствует о значительном упрочнении стружки в процессе резания. Распределение микротвердости по толщине неравномерное. У стружки стали 45 значения микротвердости выше к середине (рис. 22), у стали P6M5, наоборот, по краям (рис. 23). L – расстояние от края поверхности стружки к середине по толщине (перпендикулярно поверхности).

Деформационное упрочнение и окисление стружки (сталь 45, P6M5), образование неоднородных закалочных структур (сталь ШХ15) приводят к резкому снижению ресурса пластичности металла. Разница между значениями $\sigma_{0,2}$ и σ_b у стальной стружки незначительная. Чугунная стружка по своим прочностным характеристикам практически не отличается от материала обрабатываемой заготовки.

Таблица 4. Химический состав стружки по толщине по результатам микрорентгеноспектрального анализа

Материал	Спектр	O	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	W
		%								
Сталь 45	1	4,16	0,45	0,42	1,08	0,93				
	2	2,38	0,46	0,39	0,85	1,18				
	3	1,85	0,49	0,58	0,73	0,83				
	4	1,62	0,44	0,23	0,49	0,87				
	5	1,20	0,44	0,46	0,71	1,19				
	6	2,47	0,45	0,58	0,78	0,92				
	7	1,23	0,46	0,35	0,72	1,09				
	8	1,82	0,44	0,21	0,91	1,32				
	9	1,10	0,43	0,35	0,46	1,02				
	10	2,59	0,42	0,44	1,28	1,67				
Сталь ШХ15	1	0,57	1,05	0,23	0,78	2,34	0,01			
	2	0,40	1,20	0,05	0,34	1,23	0,13			
	3	0,51	0,97	0,12	0,53	2,23	0,16			
	4	0,68	1,03	0,36	0,28	1,53	0,14			
	5	0,51	1,04	0,04	0,37	2,43	0,09			
	6	0,85	0,95	0,17	0,48	1,81	0,03			
	7	0,37	1,1	0,34	0,28	0,92	0,01			
	8	1,21	0,99	0,22	0,13	1,63	0,24			
	9	0,72	0,98	0,26	0,28	1,09	0,00			
	10	0,15	1,00	0,18	0,09	1,64	0,02			
Сталь Р6М5	1	2,35	0,90	0,54	0,29	3,67	0,35	2,01	5,70	4,40
	2	1,06	0,86	0,79	0,41	3,93	0,31	1,12	3,33	1,41
	3	0,73	0,89	0,69	0,29	3,59	0,26	0,62	3,76	2,20
	4	1,26	0,92	0,64	0,26	4,04	0,23	1,62	3,45	1,52
	5	4,17	0,94	0,80	0,27	8,34	0,21	2,93	4,08	2,40
	6	0,12	0,90	0,72	0,40	4,66	0,11	0,93	3,71	3,19
	7	0,00	0,92	0,64	0,21	5,90	0,24	0,83	3,70	2,21
	8	0,16	0,88	0,39	0,21	4,55	0,30	0,99	10,1	13,01
	9	1,44	0,87	0,57	0,64	4,13	0,34	1,29	5,14	4,13
	10	2,84	0,91	8,82	0,15	4,95	0,40	0,88	2,02	0,42
Серый чугун СЧ25	1	10,32	3,11	5,38	0,73	1,24				
	2	1,76	3,05	2,26	0,84	0,08				
	3	2,20	2,98	1,81	1,24	0,16				
	4	2,86	3,22	2,49	0,56	0,63				
	5	28,46	3,15	2,99	3,97	0,08				
	6	1,57	2,96	2,90	0,54	0,24				
	7	4,39	3,09	1,76	0,80	0,08				
	8	1,82	2,96	2,30	0,91	0,09				
	9	19,13	2,98	2,17	0,70	0,10				
	10	25,84	3,08	1,01	0,65	0,16				

Таблица 5. Механические свойства стружки

Материал		ρ , кг/м ³	Микротвердость, ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	σ_b , ГПа
Сталь 45	ГОСТ 1050-74	$7,8 \cdot 10^3$	1,65	0,36	0,60
	Стружка	$0,71 \cdot 10^3$	2,98	0,59	0,63
Сталь ШХ15	ГОСТ 801-78	$7,8 \cdot 10^3$	2,00	0,39	0,66
	Стружка	$0,68 \cdot 10^3$	3,94	0,77	0,80
Сталь Р6М5	ГОСТ 19265-73	$7,8 \cdot 10^3$	3,27	0,51	0,85
	Стружка	$1,84 \cdot 10^3$	3,54	0,82	0,87
Серый чугун СЧ25	ГОСТ 1412-85	$7,2 \cdot 10^3$	1,70		0,25
	Стружка	$1,44 \cdot 10^3$	1,74	-	

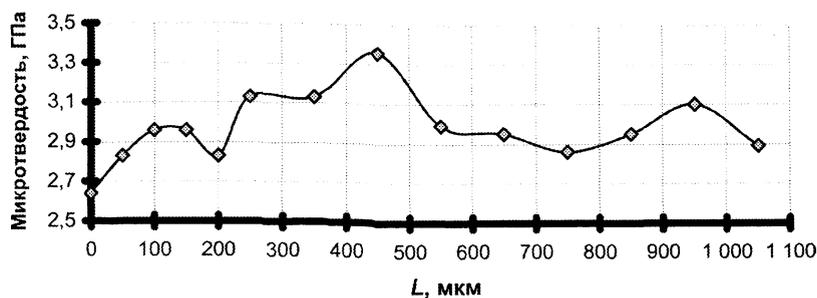


Рис. 22. Изменение микротвердости по толщине стружки стали 45

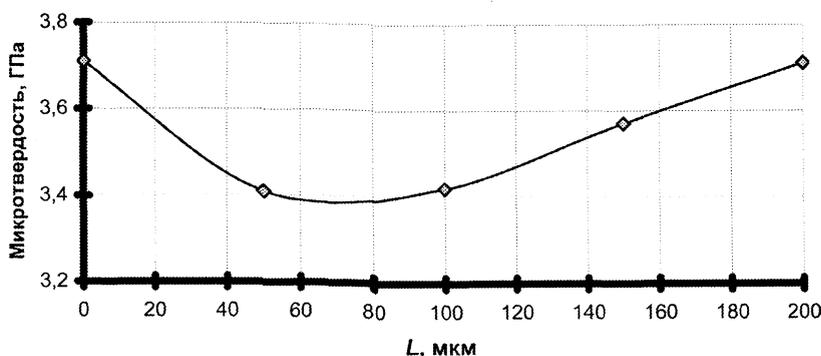


Рис. 23. Изменение микротвердости по толщине стружки стали Р6М5

В процессе пластической деформации, в данном случае при растяжении, упрочнение стальной стружки практически отсутствует. Это явление наблюдается как при холодной, так и при горячей деформации. В первом случае разрыв образца происходит без сколько-нибудь заметных следов пластической деформации, а во втором – пластическая деформация имеет место, однако разупрочняющие процессы преобладают над упрочняющими. Независимо от температуры нагрева стальной стружки ее предел текучести близок по своему значению к пределу прочности: $\sigma_T = (0,94 - 0,98)\sigma_B$. При таком незначительном упрочнении можно принять, что $\sigma_T \approx \sigma_B$.

В табл. 6 приведены значения предела прочности стружки и материала обрабатываемой заготовки (ГОСТ) в зависимости от температуры. По величине они практически совпадают. Очевидно, что снижение прочностных характеристик стружки при нагреве связано с протеканием разупрочняющих процессов.

Таким образом, в настоящей работе изучены физико-химические и механические свойства стружки – ее химический и фазовый состав, прочностные характеристики, пластичность. Определено количественное содержание фаз, в том числе, оксидов железа и других химических элементов.

Таблица 6. Изменение предела прочности стружки в зависимости от температуры

Материал		Температура, °С					
		200	300	400	500	600	700
Сталь 45	σ_B , ГПа ГОСТ 1050-74	0,69	0,71	0,56	0,37	0,21	0,13
	σ_B , ГПа, стружка	0,63	0,62	0,54	0,41	0,22	0,11
Сталь ШХ15	σ_B , ГПа ГОСТ 801-78	0,59	0,52	0,45	0,37	0,27	0,19
	σ_B , ГПа стружка	0,66	0,58	0,49	0,40	0,28	0,19
Сталь Р6М5	σ_B , ГПа ГОСТ 19265-73	0,87	0,83	0,77	0,68	0,62	0,36
	σ_B , ГПа стружка	0,85	0,82	0,80	0,71	0,63	0,39
Серый чугун СЧ25	σ_B , ГПа ГОСТ 1412-85	0,26	0,24	0,19	0,16	0,12	0,08
	σ_B , ГПа стружка	–	–	–	–	–	–

Установлено, что определяющее влияние на свойства стружки оказывают природа обрабатываемого материала и применяемых СОТС. Показано влияние различных факторов на окисляемость стружки в процессе стружкообразования. Химический состав металлической составляющей стружки в основном соответствует химическому составу материала обрабатываемой заготовки. Различие состоит в содержании кислорода, которое у стальной стружки находится в пределах 1–2%, у чугуна – до 0,5%. Показано, что стружка окисляется не только у поверхности, но и в глубине. Увеличение содержания углерода в стальной стружке приводит к образованию закалочных структур.

Исследовано распределение микротвердости по толщине стружки. Установлено, что незави-

симо от температуры нагрева предел текучести стальной стружки близок по своему значению к пределу прочности: $\sigma_T = (0,94 - 0,98)\sigma_B$ из-за высокой степени упрочнения стружки в исходном состоянии. Незначительное упрочнение наблюдается как при холодной, так и при горячей деформации, что объясняется крайне низким ресурсом пластичности металла, а также преобладанием разупрочняющих процессов над упрочняющими при нагреве металла. Предел прочности стальной стружки при повышенных температурах практически равен пределу прочности материала обрабатываемой заготовки, что также объясняется протеканием разупрочняющих процессов.

Литература

1. Система автоматизации рентгеновских дифрактометров серии «ДРОН» Программа X-Ray, версия 2.0. Руководство пользователя. М.: МГУ, 1995.
2. Система автоматизации рентгеновских дифрактометров серии «ДРОН». Программа X-Ray, версия 2.1. М.: МГУ, 2001.
3. Программный комплекс качественного и количественного рентгенофазового анализа «PDWIN». С.-Петербург: ЛНПО «Буревестник», 1987.
4. Архаров В. И. Окисление металлов при высоких температурах. Свердловск-М.: Metallurgizdat, пятая типография треста «Полиграфкнига», Свердловск, 1945.
5. Архаров В. И., Лучкин Г. П., Конев В. П., Шумилина С. В. Физика металлов и металловедение // Журн. АН СССР. 1967. Т. 24. С. 190.
6. Jokes E. S., Masker J. P., Speiser R. // Corrosion. 1958. Vol. 14, N 1. P. 21.
7. Ващенко К. И. Модифицированный чугун. М.: Машгиз, 1946.
8. Гоулдстейн Дж. и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Пер. с англ. В 2-х кн. М.: Мир, 1984.
9. Кальнер В. Д., Зильберман А. Г. Практика микронзондовых методов исследования металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981.
10. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов. М.: Наука, 1968.
11. Розенфельд И. Л., Маршakov И. К. Механизм коррозии металлов в узких зазорах и щелях. II. Коррозия железа в растворах замедлителей // Журн. физ. химии. 1957. Т. 31. Вып. 1. С. 72.