

ВВЕДЕНИЕ

Огюст Роден говорил, что задача скульптора — взять глыбу мрамора и отбросить (удалить) все лишнее. Тот же принцип лежит и в основе обработки металлов. Рабочий инструмент металлорежущего станка подобен резцу скульптора — материал под ним приобретает форму и превращается в детали разных размеров и форм. Обработка резанием — одна из самых распространенных операций в механообрабатывающей промышленности. Ученые и инженеры постоянно ищут новые технические и технологические решения, позволяющие повысить эффективность металлообработки, интенсифицировать процесс резания, сделать его более производительным и экономичным, но при этом сохранив требуемые точность и качество обработки.

Известно, что машиностроение является ведущей и важнейшей отраслью народного хозяйства, которая, как локомотив, обеспечивает развитие других важных отраслей — горнорудной, металлургической, строительной, сельскохозяйственной и прочих.

Развитие современного машиностроения характеризуется интенсификацией производственных процессов, связанной с естественным стремлением к повышению их эффективности и снижению себестоимости выпускаемых машин и механизмов. Одновременно возрастают и требования к качеству изделий.

Одно из основных требований, предъявляемых сегодня к любому изделию в машиностроении, — это технологичность в изготовлении, минимальная стоимость и максимальная надежность в эксплуатации.

Все машиностроение как отрасль народного хозяйства подразделяется на 24 подотрасли (авиастроение, судостроение, станкостроение, энергомашиностроение, автомобилестроение, сельхозмашиностроение и многие другие). К сожалению, многие подотрасли машиностроения, благодаря усилиям «младореформаторов» в 1990-е гг. во главе с Е. Г. Гайдаром, по настоящее время находятся на грани рентабельности [42–44], а это негативно влияет на развитие всего отечественного машиностроения в целом.

Анализ мировой экономики в связи с развитием COVID-19 и падением цен на нефть показывает отрицательную оценку в целом ориентации экономики на глобализацию, а также на минерально-сырьевой сектор.

Для такой страны, как Россия, только соответствующее гармоничное, последовательное развитие всех подотраслей машиностроения на основе научно-инновационных процессов позволит быть мощной державой.

В отечественном машиностроении существует сегодня ряд проблем, которые решают инженеры-технологи. Это увеличение производительности труда, сокращение больших производственных циклов, уменьшение многоступенчатости в системе подготовки и организации высококорентабельных производств машин с новыми потребительскими свойствами.

Из опыта промышленно развитых стран известно, что восприимчивость предприятий к инновациям обусловлена, прежде всего, уровнем технологий и наличием необходимого парка машин и оборудования, выпускаемых главным образом отечественным машиностроительным комплексом. Сегодня это, к сожалению, является проблематичным. При этом в условиях финансового кризиса 2008 г., 2014 г. и 2019–2020 гг. произошло снижение объемов производства в машиностроительной отрасли из-за резкого сокращения ее финансирования.

В настоящее время в работе большинства предприятий машиностроения имеется ряд серьезных недостатков, которые тормозят их развитие и конкурентоспособность:

- отсутствие относительно большой серийности объектов производства, не позволяющей отрабатывать полностью серийные (или мелкосерийные, многономенклатурные, групповые, типовые и пр.) производства, оборудование, технологии, оснастку и механизмы для них;
- отсутствие специализации производства многих комплектующих, что позволило бы перейти на их серийное изготовление и тем самым повысить его эффективность (производительность, точность, качество и надежность при значительно меньших материальных и трудовых затратах);
- во многих случаях конструкции и детали, входящие в изделия, не отрабатываются на технологичность, что повышает себестоимость их изготовления и сборки;
- при проектировании изделий конструкторы часто не представляют себе всю цепочку («петля» в западной интерпретации) его жизненного цикла — тесную увязку всех его фаз.

Жизненный цикл — это не что иное, как укрупненная модель производственного процесса, начиная от маркетинга и заканчивая удовлетворением потребности рынка соответствующим изделием и, наконец, в дальнейшем — его утилизацией [46].

Проводимый маркетинг выводит на общий образ требующегося рынку изделия (самолета, автомобиля, трактора, турбины и т. п.). Далее следует идея по созданию этого продукта. Производится разработка его функциональной модели, затем формируется структурная модель, далее структурно-параметрическая модель (с учетом дизайна и продаваемости изделия), затем технологическая модель, т. е. технологическое представление изделия (оценка возможности его изготовления в данной технологической среде, т. е. отработка технологичности), и затем — организационная модель, т. е. организация производства.

Помимо этого, представленная цепочка на каждой фазе дополняется соответствующей информацией по экономическим, организационным, сертификационным и другим аспектам.

Именно представление всех фаз жизненного цикла изделий в информационных технологиях позволяет выйти на современный уровень их создания.

Важным аспектом для повышения эффективности машиностроительного производства является специализация изготовления многих комплектующих узлов, механизмов и их деталей, используемых при дальнейшей сборке изделий. Важна при этом их стандартизация и унификация. Время, когда на одном

машиностроительном предприятии делали абсолютно все необходимое для получения конечного изделия, начиная от болта и гайки, редукторов, подъемно-транспортных механизмов, оснастки для механической обработки и сборки, режущего инструмента и заканчивая готовым изделием, давно прошло.

Сегодня многие комплектующие, при условии их определенной стандартизации и сертификации, можно изготавливать по принципу серийного производства, что является наиболее эффективным, на отдельных специализированных предприятиях в условиях современной организации труда, с последующим поступлением таких комплектующих на сборочное производство.

По данным статистики [13], на машиностроительных предприятиях России только 25...30% применяемого инструмента и оснастки изготавливается на специализированных заводах, тогда как, например, в США эта цифра составляет 65...75%. В США и Германии 85...90% машиностроительных предприятий не имеют своих инструментальных цехов и приобретают весь инструмент и технологическую оснастку у сторонних производителей. Кроме того, технологическую оснастку часто заказывают и берут в лизинг на определенное время.

Следует остановиться еще на весьма важной проблеме, которую можно охарактеризовать как «революция качества». В последние годы в связи с резким обострением конкуренции на рынке товаров принципиально изменились отношения «производитель — потребитель» [45, 46].

Производитель обязан доказывать потребителю свою способность производить качественную продукцию. Система таких доказательств постоянно развивается — от доказательств качества готового изделия (сертификация продукции) через доказательство качества процесса изготовления изделий (сертификация процессов) к доказательствам качества системы управления производственным предприятием (сертификация систем качества).

Все это включено в систему международных стандартов ИСО серии 9000 и целый ряд других стандартов.

Конец XX и настоящий XXI в. принято считать временем доминирования технологий, т. е. кто сделает продукцию дешевле, быстрее и качественнее (надежнее).

Отдавая, безусловно, дань уважения конструкторам, тем не менее сегодня технологии в значительной степени обеспечивают эффективность производства, качество и надежность производимого изделия.

Непрерывное развитие производства различных машин и механизмов, приборов и других видов изделий предъявляет все более высокие требования к технологии машиностроения вообще и методам изготовления конкретных деталей в частности. В том числе к назначению режимов обработки заготовок деталей машин, что в конечном итоге влияет на качество и эффективность технологического процесса в целом.

ГЛАВА 1

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Сущность технологии изготовления деталей машин состоит в последовательном использовании различных технологических способов воздействия на обрабатываемую заготовку с целью придания ей заданной формы и размеров указанной точности. Одним из таких способов является механическая обработка заготовок резанием. Она осуществляется металлорежущим инструментом и ведется на металлорежущих станках. Обработка резанием заключается в срезании с обрабатываемой заготовки некоторой массы металла, специально оставленной на обработку и называемой припуском [29, 62].

1.1. Конструкционные металлы и их механические свойства

В машиностроении для изготовления несущих нагрузку деталей используют конструкционные металлы [7, 14, 22, 30, 38, 50].

К основным конструкционным металлам относят:

- а) черные металлы — сплавы на основе железа (углеродистые, легированные и нержавеющие стали, специальные сплавы, чугуны);
- б) цветные металлы — сплавы на основе меди, алюминия, титана и других элементов.

Конструкционные металлы имеют различные механические свойства, зависящие от их химического состава и структурного состояния. Сочетание таких характеристик, как химический состав, механические свойства и структурное состояние металла, определяет сопротивление обработке резанием. Обрабатываемость металлов резанием находит свое проявление в общих закономерностях процессов стружкообразования и обеспечения качества обработанных поверхностей.

В машиностроении принята стандартная маркировка конструкционных металлов, где указывается процентное содержание в металле основных легирующих элементов. Маркировка конструкционных металлов состоит из сочетания букв русского алфавита и цифр. Для легирующих элементов приняты следующие буквенные обозначения: азот — А; ниобий — Б; вольфрам — В; марганец — Г; медь — Д; селен — Е; молибден — М; никель — Н; фосфор — П; бор — Р; кремний — С; титан — Т; углерод — У; ванадий — Ф; хром — Х; цирконий — Ц; алюминий — Ю.

В маркировке за каждой из букв обычно указаны цифры, которые показывают содержание (в процентах) соответствующего легирующего элемента, закодированного этой буквой, равное одному проценту. Цифры, стоящие в маркировке первыми, указывают содержание в металле углерода в сотых долях процента.

Элементы, содержание которых в металле менее одного процента, в маркировку не включаются. Например, конструкционная углеродистая сталь 45 содержит 0,45% углерода; хромистая сталь 40Х — 0,4% углерода и 1% хрома; хромоникелевая сталь 30ХН — 0,3% углерода, 1% хрома и 1% никеля.

По составу и содержанию легирующих элементов конструкционные стали делят на группы (сталь — от нем. stahl):

- стали, содержащие только углерод, образуют группу наиболее широко применяемых в машиностроении углеродистых конструкционных сталей (стали 40, 45 и др.);
- стали, содержащие кроме углерода около одного процента хрома, образуют группу более качественных хромистых конструкционных сталей (стали 20Х, 40Х и др.);
- стали, содержащие 0,2...0,5% углерода и по 1% хрома и никеля, образуют группу хромоникелевых сталей (стали 20ХН, 30ХН и др.);
- стали, кроме углерода содержащие еще по 1% три легирующих химических элемента, образуют группы хромокремнемарганцовистых (стали 20ХГСА, 30ХГСА и др.), хромоникелевольфрамовых (стали 20ХНВА и др.), хромоникелемолибденовых (стали 40ХНМА и др.) сталей. Наиболее широко применяемые в машиностроении марки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей и их механические свойства приведены в таблице 1.1. Из данной таблицы видно, что легированные стали имеют более высокие механические свойства, чем углеродистые. С повышением механических свойств металлов (твердости, предела прочности) возрастает сопротивление металлов обработке резанием, т. е. ухудшается их обрабатываемость.

Таблица 1.1

**Механические свойства конструкционных сталей,
группа сталей, марка**

Группа сталей	Марка	Твердость, НВ	Предел текучести, σ_T , ГПа	Предел прочности, σ_B , ГПа	Относитель- ное удлине- ние, δ , %
Углеродистые	40	187	0,34	0,58	19
	45	197	0,36	0,61	16
	50	207	0,38	0,64	14
Хромистые	20Х	179	0,65	0,80	11
	40Х	217	0,80	1,00	10
	45Х	229	0,85	1,05	9
Хромоникелевые	20ХН	197	0,60	0,80	14
	30ХН	207	0,80	1,00	14
	45ХН	217	0,85	1,05	10
Хромокремне- марганцовистые	20ХГСА	207	0,65	0,80	12
Хромоникеле- вольфрамовые	30НВА	241	0,80	1,00	10
Хромоникелемо- либденовые	40ХНМА	269	0,95	1,10	12

В машиностроении применяются также высоколегированные качественные конструкционные стали. Высокое содержание легирующих элементов придает сталям необходимые эксплуатационные свойства: коррозионную стойкость, механическую прочность, пластичность. В то же время в связи с увеличением сопротивления обработке резанием имеет место существенное снижение параметров режимов обработки этих сталей режущими инструментами.

Высоколегированные качественные конструкционные стали делятся на шесть классов [7, 14, 24, 30, 52]:

1) стали мартенситного класса марок X5, X5M, X5ФВ, X6СМ, 1X8ВФ, 4X9C2, 4X10C2M, 1X12H2BMФ, 2X13, 3X13, 9X18, 1X17H2 и др.;

2) стали мартенситно-ферритного класса марок X6СЮ, 1X11МФ, 1X12ВНМФ, 15X12ВМФ, 2X12ВМБФР, 1X12В2МФ, 1X13;

3) стали ферритного класса марок 1X12СЮ, X14, X17, X28, X18СЮ, X25Т и др.;

4) стали аустенитно-мартенситного класса марок 2X13H4Г9, X15H9Ю, X17H7Ю, 2X17H2;

5) стали аустенитно-ферритного класса марок X20H14C2, 1X21H5Т, X23H13 и др.;

6) стали аустенитного класса марок X12H22Т3МР, 4X18H25C2, X25H20C2, X16H15M3Б, 1X14H18B2БР и др.

Основными легирующими элементами высоколегированных марок конструкционных сталей являются хром (до 28%), никель (до 25%) и марганец (до 14%).

Для удовлетворения нужд развивающейся техники были разработаны и применяются в качестве конструкционных металлов специальные жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы двух групп:

- сплавы на железоникелевой основе с содержанием 35–38% никеля;
- сплавы на никелевой основе с содержанием 60–80% никеля.

Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы весьма пластичны и трудно поддаются обработке резанием.

В машиностроении для изготовления корпусных деталей широкое применение нашел чугун.

Чугун (название из тюркского языка) — сплав железа с углеродом (2–4%). Содержит постоянные примеси (Si, Mn, S, P и др.) до 0,1%. Основная масса чугуна (85%) перерабатывается в сталь (перелитейный чугун), остальная применяется для изготовления фасонного литья (литейный чугун). По микроструктуре [3, 7] различают серый чугун (СЧ), в котором углерод присутствует в виде пластинчатого или шаровидного графита, белый чугун (БЧ), в котором углерод присутствует в виде цементита или карбида железа, и ковкий чугун (КЧ), получаемый отжигом белого чугуна (хлопьевидный графит).

Обрабатываемость чугунов резанием принято оценивать по их твердости. С повышением твердости обрабатываемость чугуна ухудшается. Чугуны принято условно разделять на мягкие с твердостью в пределах HB 140...160, среднетвердые с твердостью HB 160...180 и твердые с твердостью HB 180...220. Чу-

чуны весьма малопластичны и хрупки. По сравнению со сталями при обработке чугунов силы резания и затраты энергии уменьшаются.

Многие детали машин и приборов изготавливают из так называемых цветных металлов — латуни, бронзы и сплавов алюминия.

Бронза (от *фр.* bronze) — сплав меди с другими элементами (например, Sn, Al, Be, Pb, Cd, Cr), соответственно она называется оловянной, алюминиевой, бериллиевой, свинцовистой, кадмиевой или хромистой бронзой.

Латунь (от *нем.* latun) — сплав меди с цинком (от 15 до 50%), часто с добавками алюминия, олова, железа, марганца в очень небольших количествах. Реже добавляют никель, кремний, свинец. В сумме все элементы, кроме цинка, составляют не более 10%.

Алюминий (*лат.* aluminium от alumen — квасцы). Легкий серебристо-белый металл, весьма пластичный, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $t_{пл} = 660^\circ\text{C}$. В машиностроении применяется как сам алюминий (редко), так и его сплавы с другими металлами.

Дуралюмин (дюралюмин, дуралюминий, дюраль; от *нем.* Duren — город, где было начато промышленное производство сплава) — сплав алюминия с медью (2,2...5,2%), магнием (0,2...2,7%) и марганцем (0,2...1%). Общее содержание других металлов, как правило, не превышает 6...8%. Важная особенность дюралюминия — способность упрочняться после закалки. Подвергается старению. Часто плакируется с алюминием. Как конструкционный материал широко используется в машиностроении (авиа- и ракетостроении, судостроении, приборостроении и др.).

Силумин — легкий литейный сплав на основе алюминия с добавлением кремния (4...13%), в редких случаях до 24%. Кроме того, могут быть добавлены некоторые другие элементы (от 0,5 до 1,0%) — медь, марганец, магний, цинк, титан и бериллий. Изготавливают детали сложной конфигурации в основном в авиа- и автостроении.

Инвар (от *лат.* invariabilis — неизменный) — магнитный сплав на основе железа с добавлением никеля (30...40%). Обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения (6...10). Выпускается также суперинвар (64% Fe, 32% Ni и 4% Co) и нержавеющей инвар (54% Co, 37% Fe и 9% Cr). Сплав используется в космической технике и специальном приборостроении.

Титан (от *греч.* titanes — титаны) — серебристо-белый металл, легкий, тугоплавкий, прочный, пластичный, $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$, $t_{пл} = 1660^\circ\text{C}$.

Цветные металлы и их сплавы всех марок сравнительно легко поддаются обработке резанием. Исключение составляют титановые сплавы.

По сравнительной обрабатываемости резанием, энергоемкости образования новых поверхностей на заготовках и на срезаемой стружке все конструкционные металлы могут быть условно разделены на четыре группы:

1) легкообрабатываемые, например латуни, бронзы, деформируемые сплавы алюминия, мягкие чугуны;

2) средней обрабатываемости — углеродистые и низколегированные конструкционные стали, силумины, чугуны средней твердости;

3) ниже средней обрабатываемости — высоколегированные нержавеющей конструкционные стали мартенситного, мартенситно-ферритного, аустенитно-мартенситного классов, твердые чугуны;

4) труднообрабатываемые — высоколегированные конструкционные стали аустенитного класса, жаропрочные и жаростойкие и тугоплавкие сплавы.

Стали, поставляемые металлургической промышленностью машиностроительным заводам, находятся в отожженном состоянии. Если структурное состояние и механические свойства сталей в состоянии поставки не удовлетворяют требованиям изготовления из них качественных деталей, то эти стали подвергаются промежуточной термообработке с целью улучшить их структурное состояние и механические свойства.

1.2. Обрабатываемость металлов резанием

Обрабатываемость резанием является технологической характеристикой материала, которая определяется комплексом его физико-механических свойств. При механической обработке обрабатываемость определяют следующими критериями: интенсивностью износа инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, величинами возникшей силы резания и температуры, а также получающимся при обработке качеством поверхности. Эти количественные значения обрабатываемости зависят от структуры и механических свойств материала, химического состава, способа получения заготовки и режима ее термообработки [4, 5, 14, 19, 22, 24, 38, 49, 52, 56, 59, 61, 63, 67, 75].

Обрабатываемость материала определяется применяемым способом резания, так как один и тот же материал может плохо обрабатываться одним методом резания и хорошо — другим. Следовательно, обрабатываемость материала резанием не является его константой; она зависит от комплекса первичных параметров, определяющих протекание физического механизма процесса, и вторичных параметров обработки. Обрабатываемость материала зависит также от вида операции и принимаемого критерия затупления инструмента. Так, например, обрабатываемость лезвийным инструментом может резко отличаться от обрабатываемости абразивным; многие материалы хорошо режутся на черновых операциях и плохо — на чистовых. Затрудненное стружкоудаление на операциях обработки отверстий может оказывать влияние на обрабатываемость резанием этого материала в целом. В соответствии с этим изменяются и критерии обрабатываемости. Так, например, для черновых операций критерием обрабатываемости является интенсивность износа инструмента, для отделочных — шероховатость поверхности или эксплуатационные характеристики поверхностного слоя; для операций глубокого сверления и многих операций, выполняемых на автоматизированном оборудовании, — вид образующейся стружки, определяющей удобство ее удаления из зоны резания.

Следовательно, обрабатываемость резанием является комплексным показателем, учитывающим как физическую картину протекания самого процесса, так и технологические особенности выполняемой операции.

Поэтому количественное выражение обрабатываемости данного материала резанием для определенного метода обработки оценивается показателями жесткости всей технологической системы в целом, а именно станка, технологической оснастки (приспособлений и инструмента) и обрабатываемой заготовки.

Так, применительно к механической обработке заготовок обрабатываемость материала по критериям — интенсивность износа и прочность инструмента — характеризуется количеством обработанных заготовок или объемом срезаемого материала за период стойкости инструмента, определенным в процессе испытаний при стандартных условиях. С точки зрения условий работы станка обрабатываемость материала оценивается при стандартных условиях критериями, выражаемыми величинами действующих на него сил и требующейся на процесс резания мощностью, а также виброустойчивостью станка и простотой его обслуживания. С точки зрения работы приспособления оценивается необходимое усилие закрепления заготовки, надежность закрепления и виброустойчивость приспособления.

К обрабатываемости материала следует также отнести критерий, характеризующий вид стружки, образующейся при обработке данного материала резанием (сливная или элементная), возможность ее дробления и надежного удаления из зоны резания.

Обрабатываемость материала резанием с точки зрения детали характеризуется ее эксплуатационными характеристиками и прежде всего такими показателями, как точность обработки и качество поверхности.

К числу показателей, определяющих сущность термина «обрабатываемость резанием», относятся:

- сила резания (крутящий момент вращения) по сравнению с эталонным металлом (сталь 45), измеренная в равных режимных условиях;
- эффективная мощность, затрачиваемая на резание, по сравнению с эталонным металлом в равных режимных условиях;
- усадка стружки как мера пластической деформации, необходимой для срезания и образования новых поверхностей на стружке и обрабатываемой заготовке;
- наличие или отсутствие склонности к наростообразованию в равных условиях резания;
- качество поверхности, обработанной резанием в равных и оптимальных режимных условиях, оцениваемое шероховатостью и остаточным напряжением в поверхностных слоях изготовленной детали;
- интенсивность изнашивания инструментального материала по сравнению с резанием эталонного металла;
- теплота, выделяющаяся при деформации материала срезаемого слоя и контактом взаимодействии трущихся поверхностей, а также ее распределение между стружкой, обрабатываемым материалом и инструментом;
- вид, форма и размеры срезанной стружки, которые определяют ее отвод, хранение и транспортирование;
- энергозатраты на единицу срезаемого слоя стружки.

Основным направлением улучшения обрабатываемости заготовок деталей машин является разработка методов резания, с одной стороны, значительно усиливающих воздействие на материал срезаемого слоя или качественно его изменяющих и, с другой стороны, создающих наиболее благоприятные условия для работы инструмента. Сопоставление количественных оценок обрабатываемости

мости, например стойкости инструмента, допустимо лишь при соблюдении равных условий резания, типичных для сравниваемых групп конструкционных и инструментальных материалов. Повышению эффективности обработки заготовок в машиностроении, особенно изготовленных из специальных труднообрабатываемых материалов, способствует создание специальных и комбинированных методов обработки.

1.3. Труднообрабатываемые стали и сплавы

Развитие техники связано с созданием и освоением технологии обработки сталей и сплавов с особыми физико-механическими свойствами, важнейшими из которых являются коррозионная стойкость в различных средах, жаропрочность и высокая механическая прочность. Коррозионно-стойкие, жаропрочные и высокопрочные материалы содержат железо, никель, титан, молибден, вольфрам и другие элементы. Специальные стали обладают достаточной прочностью при температуре до 700°C; сплавы на основе никеля — до 1100°C; сплавы на основе молибдена и ниобия обладают достаточной прочностью при температуре до 1500°C; сплавы на основе вольфрама — до 2000°C. Для работы в условиях термических ударов или воздействия тепловых потоков применяются комбинированные материалы, состоящие из пористого вольфрама (плотностью 75...80% от компактного), пропитанного легкоплавким металлом — медью или серебром; последний, плавясь и испаряясь, охлаждает изделие [2, 10, 19, 24, 30, 38, 50, 61, 75].

Широкое применение находят материалы с высокой удельной прочностью. Из труднообрабатываемых материалов к ним в основном относятся титановые сплавы и высокопрочные стали. Титановые сплавы обладают также высокой коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред. Применяются три группы высокопрочных сталей.

1. Низколегированные высокопрочные стали, содержащие 0,25...0,45% C; до 5% Cr; до 2,5% Ni; марганца, молибдена и вольфрама до 1,5% каждого; ванадия и кремния до 1% каждого. Эти стали в зависимости от химического состава и режима термической обработки имеют предел прочности 1500...2150 МПа.

2. Коррозионно-стойкие (нержавеющие) высокопрочные стали, содержащие около 12% Cr и примерно в таком же количестве, как и предыдущие стали, другие легирующие элементы. Путем закалки и отпуска предел прочности не может быть повышен до 1700 МПа. Термомеханическим упрочнением прочность обеих групп сталей может быть увеличена до 2540...2900 МПа. Однако для деталей, работающих в тяжелых условиях, применяются стали с $\sigma_B = 1400...1700$ МПа, так как стали с большей прочностью имеют низкую пластичность и малое сопротивление распространению трещины.

3. Безуглеродистые мартенситно-старееющие стали содержат до 17...19% Ni, до 7...9% Co, до 4...6% Mo и 0,5...1% Ti. После закалки с 800...850°C и старения при 480...500°C эти стали имеют высокую прочность и достаточно высокую пластичность: $\sigma_B = 1800...2000$ МПа; $\delta = 8...12\%$; $\psi = 40...60\%$. Повышение содержания кобальта в этих сталях до 12...16% и молибдена до 8...12% при

12...13% никеля позволяет после старения получить $\sigma_B = 1700$ МПа; $\delta = 8\%$; $\psi = 42\%$; HRC 62. Однако с повышением жаропрочности сталей и сплавов имеется определенная тенденция к снижению применяемых скоростей резания; при обработке ряда жаропрочных сплавов применяются скорости резания, в 10...20 раз меньшие, чем при обработке стали 45. Скорости резания, применяемые при обработке высокопрочных сталей, как правило, обратно пропорциональны квадрату их предела прочности.

Основной причиной низкой обрабатываемости труднообрабатываемых сталей и сплавов является возникновение при их обработке больших сил и высоких температур в зоне резания. При обработке жаропрочных сталей силы резания в 1,5 раза больше, а при обработке жаропрочных сплавов в 2...2,5 раза больше, чем при обработке стали 45. При обработке заготовок из титановых сплавов возникают примерно такие же силы, что и при обработке заготовок из стали 45. При точении заготовок из высокопрочных сталей силы резания в 2...3 раза больше, чем при точении заготовок из стали 45. Большие силы при резании заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов обуславливают большое количество теплоты, выделяющееся на единицу срезаемого объема металла. Кроме того, большинство труднообрабатываемых сталей и сплавов имеют низкую теплопроводность, что приводит к возникновению высоких температур в зоне резания.

При обработке заготовок из титановых сплавов усадка стружки весьма мала и при определенных условиях происходит не усадка, а удлинение стружки. Это явление названо «отрицательной» усадкой стружки. Причиной малой усадки стружки при резании титановых сплавов является их низкая пластичность. Малая усадка обуславливает малую площадь контакта стружки и передней поверхности инструмента и большую скорость перемещения стружки по передней поверхности инструмента, что вызывает высокие контактное давление и температуру.

Большие силы, возникающие при резании труднообрабатываемых материалов, вызывают необходимость обеспечения большой жесткости технологической системы. Высокие контактные температуры являются основной причиной низкой стойкости инструмента и необходимости использования малых скоростей резания при обработке труднообрабатываемых материалов.

Все специальные стали и сплавы классифицированы [50]. В основу классификации положен химический состав материалов, поскольку от него в основном зависит обрабатываемость жаропрочных сталей и сплавов. По предлагаемой классификации все рассматриваемые стали и сплавы разделены на восемь групп, в каждую из которых объединены стали или сплавы примерно одинакового химического состава, одинаковых механических свойств и близкой обрабатываемости резанием (см. табл. 1.2).

При разработке новых марок труднообрабатываемых сталей и сплавов классификация дает возможность относить их по химическому составу к соответствующей группе. При этом можно приближенно определять трудоемкость механической обработки заготовок из новых материалов.

При составлении классификации были приняты следующие определения специальных сталей и сплавов:

1) под теплостойкими понимаются стали, обладающие способностью противостоять деформации и разрушению при механическом нагружении в области температур ниже 550°C, когда не возникает опасности интенсивного окисления;

2) под коррозионно-стойкими (нержавеющими) понимаются стали, обладающие стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой, морской и др.);

3) под жаростойкими (окалиностойкими) понимаются стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550°C, работающие в ненагруженном или мало-нагруженном состоянии;

4) под жаропрочными понимаются стали и сплавы, обладающие способностью работать в нагруженном состоянии при высоких температурах (выше 700°C) в течение определенного времени, имеющие при этом достаточную окислительную стойкость;

5) под высокопрочными сталями понимаются стали, у которых $\sigma_B \geq 1500$ МПа.

Стали, отнесенные к I группе, характеризуются содержанием хрома до 6%, никеля до 3%, молибдена до 0,6%, ванадия до 0,8% и кремния до 2%. Они являются теплостойкими материалами, применяются при изготовлении впускных и выпускных клапанов двигателей, лопаток и дисков турбин, а также деталей котельных установок, работающих при температурах до 500...600°C. Обрабатываемость сталей I группы удовлетворительная, почти не отличается от обрабатываемости углеродистых и низколегированных конструкционных сталей соответствующей прочности.

Стали II группы характеризуются высоким содержанием хрома (более 12%) и небольшим содержанием (до 4%) других легирующих элементов. Они применяются в основном для изготовления арматуры, турбинных лопаток и дисков, работающих при температурах до 500...550°C (12X13, 20X13, 15X12BMФ, ЭИ961 и др.), хирургического инструмента, шарикоподшипников (30X13, 40X13) и других деталей с высокой коррозионной стойкостью. В эту же группу объединены высокохромистые стали, которые после закалки и соответствующего отпуска имеют предел прочности более 1500 МПа (ЭП311).

Обрабатываемость этих сталей в указанном состоянии соответствует обрабатываемости высокопрочных сталей VIII группы. Однако поскольку при обработке заготовок из этих сталей основной припуск срезается в отожженном состоянии заготовки, то обрабатываемость их аналогична обрабатываемости высокохромистых сталей с $\sigma_B = 800...950$ МПа, они отнесены ко II группе.

Механическая обработка заготовок из стали II группы производится как после отжига (12X13, 20X13, 14X17H2, 15X12BMФ и др.), так и после термической обработки $\sigma_B = 950...1400$ МПа (30X13, 40X13, ЭИ961, ЭП56, ЭП65 и др.). В отожженном состоянии заготовки из этих сталей имеют удовлетворительную обрабатываемость: скорости резания примерно в 1,5...2 раза ниже скоростей ре-

зания, применяемых при обработке заготовок из стали 45. С повышением прочностных характеристик сталей в результате их термической обработки обрабатываемость высокохромистых сталей резко снижается. Заготовки из стали этой группы, термически обработанные до $\sigma_B \geq 1000$ МПа, по возможности должны обрабатываться инструментом из твердых сплавов.

Таблица 1.2

**Классификация основных конструкционных материалов
по их обрабатываемости резанием**

Группа стали или сплава	Наименование	Термическая обработка	Предел прочности σ_B , ГПа	Коэффициент от- носительной об- рабатываемости
I	Сталь углеродистая Сталь легированная	Отжиг, нормализация	0,47...0,74	0,70...1,00
			0,75...0,90	0,35...0,70
II	Сталь коррозионно- стойкая (нержавею- щая) высокохроми- стая	Закалка и отпуск	0,65...0,85	0,55
			0,85...1,20	0,45
III	Сталь коррозионно- стойкая (нержавею- щая) жаростойкая	Закалка	0,50...0,60	0,55
		Закалка и старение	0,80...1,00	0,30
IV	Сталь жаропрочная аустенитная			0,35
V	Сплав жаропрочный (деформируемый)	Закалка и старение	0,80...1,00	0,16
			1,00...1,25	0,07...0,10
VI	Сплав жаропрочный литейный		0,80...1,00	0,04...0,08
VII	Сплав на основе ти- тана	Отжиг	0,45...0,70	0,50
		Закалка и старение	0,70...1,15	0,28
VIII	Сталь высокопрочная		Закалка и отпуск	1,15...1,40
		До 1,20		0,10
		До 1,40		

Примечание. В таблице указана примерная относительная обрабатываемость при чистовой обработке на операциях точения, торцового и концевое фрезерования для наиболее характерного термического состояния данной группы материалов.

При обработке заготовок из сталей II группы в отожженном состоянии получить поверхности высокого класса шероховатости затруднительно, особенно при нарезании резьбы, протягивании, цилиндрическом фрезеровании и других операциях.

Аустенитные стали, отнесенные к III группе, содержат большое количество хрома (более 15%), никеля (более 5%) и в небольшом количестве другие легирующие элементы (титан, кремний и др.). К этой группе отнесены также стали аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов. Стали аустенитно-ферритного класса (ЭИ811) по обрабатываемости резанием аналогичны стали 12X18H10T. Стали аустенитно-мартенситного класса (ЭИ904, ЭИ925) по технологическим характеристикам близки к аустенитным, а по

прочностным — к мартенситным сталям. После отжига обрабатываемость этих сталей близка к обрабатываемости стали 12Х18Н10Т, а после закалки и отпуска — к сталям II группы соответствующей прочности.

Стали III группы получили широкое распространение как кислотостойкие, нержавеющие и жаропрочные материалы. Они применяются почти во всех отраслях промышленности для изготовления деталей сварной аппаратуры, лопаток и заклепок компрессорных машин, паровых труб и других деталей, работающих в условиях, вызывающих коррозию металла, или в условиях высоких температур — до 800°C. Скорости резания, применяемые при обработке заготовок из сталей III группы, примерно в два раза ниже скоростей резания, применяемых при обработке заготовок из стали 45.

К IV группе относятся сложнолегированные стали аустенитного класса, содержащие в большом количестве хром (12...25%), никель (более 5%) и в несколько меньшем количестве марганец, молибден, титан, вольфрам, ванадий и другие легирующие элементы. В ряде сталей содержание никеля снижено за счет увеличения содержания более дешевого и менее дефицитного марганца (ЭИ481, ЭИ835 и др.). Из сталей этой группы изготавливают диски и лопатки газовых турбин, детали газопроводных систем и крепежные детали, работающие при температурах до 650...750°C, а при умеренных напряжениях — до 800...950°C. Обрабатываемость резанием заготовок из сталей IV группы в 3...4 раза ниже обрабатываемости заготовок из стали 45.

К V группе относятся жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой и железоникелевой основах, легированные большим количеством хрома (10...20%) и несколько меньшим количеством титана, алюминия, вольфрама, молибдена и другими элементами. Они применяются для изготовления деталей машин, работающих при больших нагрузках и высоких температурах — от 750 до 900...950°C (дисков, рабочих и направляющих лопаток и других деталей газовых турбин). Обрабатываемость резанием заготовок из сплавов V группы в 6...12 раз ниже обрабатываемости заготовок из стали 45.

Литейные жаропрочные сплавы VI группы широко применяются для изготовления сопловых лопаток, цельнолитых роторов и других деталей газовых турбин. Они более легированы и вследствие этого более жаропрочны, чем деформируемые жаропрочные сплавы. Из-за неоднородной литой структуры механические свойства их значительно различаются. По обрабатываемости резанием они отличаются от сплавов V группы. Различная обрабатываемость литейных и деформируемых жаропрочных сплавов объясняется тем, что литейные сплавы менее вязкие, силы резания при их обработке значительно ниже, чем при обработке деформируемых сплавов. В литейных и жаропрочных сплавах имеется большое количество интерметаллидных и карбидных включений, которые сильно влияют на износостойкость инструмента. Это создает более благоприятные условия для работы твердосплавного инструмента и менее благоприятные условия для работы инструмента из быстрорежущей стали.

Высокая прочность, коррозионная стойкость и способность выдерживать высокие температуры сделали никелевые сплавы популярными в аэрокосмической отрасли и при химической обработке. Но те же свойства делают материа-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru