



Автоматные нержавеющие стали

N. Renaudot, M. Mantel, группа компаний Schmolz+Bickenbach, научно-исследовательский центр завода UGITECH S.A., авеню Поль Жиро, 73403 Юджин, Франция
Технический редактор статьи: **И.Я. Марьин**, технический директор ООО «ШМОЛЦ+БИКЕНБАХ»

Из-за большого количества влияющих факторов обрабатываемость резанием (т.е. способность подвергаться обработке) является очень сложным понятием. Среди прочих важных факторов могут быть названы скорость резания, скорость подачи, глубина резания, вид смазывающих веществ, износ инструмента, сход стружки и потребляемая токарным центром энергия.

Очень часто обрабатываемость резанием определяется эмпирическим путём. Для традиционных сталей и стандартных условий работы давно существуют таблицы с рекомендованными параметрами резания, в которые, к сожалению, ещё не включена информация о новых марках сталей, например «дуплекс», или об автоматных нержавеющих сталях семейства UGIMA®.

Эта статья описывает не только свойства сталей, но и факторы, улучшающие обрабатываемость резанием.

Введение

Резание – один из множества способов обработки нержавеющей стали. Резанием обрабатывается не только нержавеющий сортовой, но и листовой прокат – в этом случае часто используется механическое соединение при помощи винтов, болтов или заклёпок. Если смотреть в общем, обработка резанием – это технологический процесс, при котором заданная форма

достигается путём удаления части материала при помощи инструмента. Возможность придать ту или иную форму зависит не в последнюю очередь от свойств обрабатываемого материала. В частности, обрабатываемость резанием нержавеющей сталей различается в зависимости от принадлежности конкретной их марки к определённому классу.

Нержавеющие стали, особенно аустенитного класса, долгое время считались слишком сложными в обработке, поэтому их обрабатываемость резанием рассматривалась как вторичное свойство. Однако, производители стали не оставляли попыток улучшить обрабатываемость, и в конечном итоге их усилия увенчались успехом. Было создано семейство автоматных нержавеющих сталей, которое сегодня состоит из двух видов:

- Автоматные стали с повышенным (в пределах норм) содержанием серы;
- Автоматные стали с контролируемым содержанием особых оксидных комплексов, наиболее известные как стали UGIMA®, чья улучшенная обрабатываемость резанием достигается благодаря контролируемому распределению и химическому составу оксидных включений на основе Al-Si-Ca.

Метод управления распределением комплексных оксидных включений может быть применён как к сталям с низким содержанием серы (по стандарту до 0,03% S), так

и к сталям с повышенным содержанием серы (по стандарту до 0,35% S).

В обоих случаях жёсткий контроль химического состава во время выплавки и во время внепечной обработки стали помогает добиться оптимального содержания и распределения неметаллических включений, улучшающих отделение стружки и создающих между стружкой и инструментом во время обработки резанием особый смазывающий слой.

Критерии обрабатываемости резанием

На обрабатываемость резанием может влиять большое количество факторов, но из практических соображений в данной статье будут рассмотрены только те факторы, которые могут быть легко визуально обнаружены и измерены, например, сход стружки, стойкость инструмента, качество обрабатываемой поверхности (шероховатость), количество потребляемой энергии.

Первые два критерия часто определяются стандартными тестами, проводимыми с помощью твердосплавного инструмента с покрытием. Эти тесты обозначаются $Vb_{15/0,15}^1$ и «Пара Инструмент/Материал²» (СТМ).

$Vb_{15/0,15}$ — это скорость резания при токарной обработке с заданной скоростью подачи (0,25 мм/оборот) и глубиной реза (1,5 мм), при которой износ инструмента составляет 0,15 мм за 15 минут. Конечно, чем выше $Vb_{15/0,15}$, тем лучшими свойствами в плане обрабатываемости обладает сталь.

Тест «СТМ» — это более продолжительный тест по токарной обработке, который позволяет получить в три раза больше информации об обрабатываемости резанием.

Во-первых, благодаря измерению нагрузки на инструмент этот тест позволяет узнать ту минимальную скорость резания, ниже которой температура стружки становится слишком низкой, что приводит к увеличению нагрузки на инструмент и сокращению его срока службы.

Во-вторых, этот тест позволяет определить зону снятия стружки³ (CBZ), т.е. ту область параметров резания, где сход стружки — хороший при оптимальной скорости подачи и глубине реза (стружка достаточно мелкая и позволяет избежать выхода инструмента из строя или ухудшения качества поверхности изделия вследствие обработки). Конечно, чем больше эта область, тем лучшими свойствами в плане обрабатываемости обладает сталь.

В конечном итоге, этот тест позволил вывести эмпирическим путём так называемый закон Тейлора (Taylor's law), который соотносит стойкость инструмента с параметрами резания.

Этот же тест в немного изменённой форме может быть применён и для обработки сверлением.

Обработка резанием различных марок нержавеющей стали

Аустенитные нержавеющие стали

Стали этого класса обладают высокой степенью холодного упрочнения (упрочнения при холодной деформации). По этой причине при обработке резанием прутков из аустенитных сталей происходит быстрое упрочнение образующейся стружки, приводящее к возрастанию нагрузки на инструмент, из-за чего сокращается срок его службы.

Если же обработке резанием подвергаются предварительно деформированные в холодном состоянии прутки, то это ещё в большей степени повышает нагрузку на обрабатываемый инструмент и понижает его стойкость.

Повышенное содержание в аустенитных сталях таких элементов, как С и N, повышает степень холодного упрочнения, что объясняет различие в результатах теста $Vb_{15/0,15}$, проводимого на родственных сталях 1.4307/03X18H11 и 1.4301/08X18H10 или 1.4404/03X17H13M2 и 1.4401/07X17H13M2 (см. таблицу 1).

	1.4307 03X18H11	1.4301 08X18H10	1.4404 03X17H13M2	1.4401 07X17H13M2
C (%)	0,020	0,040	0,020	0,040
N (%)	0,055	0,075	0,040	0,030
Mo (%)	-	-	2,0	2,0
$Vb_{15/0,15}^*$ (м/мин)	280	260	240	225

* Обрабатывающий инструмент Z250 SNMG 120408-95

Таблица 1. Влияние С, N и Mo на обрабатываемость резанием нержавеющей сталей аустенитного класса

Содержание Mo, который выступает в качестве замещающего элемента в кристаллической решётке, увеличивает степень упрочнения вследствие большего размера ионов и, тем самым, также оказывает негативное влияние на результаты теста $Vb_{15/0,15}$ (см. таблицу 1).

Однако, даже если металл подвергся сильному холодному упрочнению, его вязкость остаётся достаточной для образования длинной стружки, которая налипает на инструмент. Это может привести к образованию наростов на инструменте (эффект налипания), что увеличивает нагрузку при резании и риск поломки инструмента. Тем не менее, высокие нагрузки при резании необходимы, даже несмотря на то, что они приводят к быстрому износу инструмента и риску поломки или повреждения его режущей кромки.

В некоторых случаях (особенно при сверлении), повышение в стали содержания С или N или увеличение степени холодного упрочнения может положительно сказываться на обрабатываемости резанием, расширяя область хорошего схода стружки.

Кроме того, теплопроводность аустенитных сталей в три раза ниже, чем у углеродистых сталей, что приводит к повышению температуры в зоне резания и соответственно сокращению срока службы инструмента.

Чтобы компенсировать сложности в обработке резанием аустенитных сталей, вызванные их низкой тепло-

¹ Стандарт — NF ISO 3685, 1993

² Стандарт — NF E 66 520-3, 1997

³ BAYOL J. et Al. Usinage des aciers inoxydables : étude du tournage avec outils en carbure de tungstène revêtus, Machines production, no 562, 1991, p. 21-30.



проводностью и высокой степенью холодного упрочнения, следует выбирать аустенитные стали с содержанием серы до 0,030% или в отдельных случаях до 0,35%.

Ферритные нержавеющие стали

Ферритные стали менее подвержены холодному упрочнению, чем аустенитные, предел прочности при растяжении увеличивается всего на 200 МПа при 50-процентном холодном деформировании, в то время как предел прочности некоторых аустенитных сталей в аналогичной ситуации возрастает на 1000 МПа. Это свойство ферритных сталей положительно влияет на срок службы обрабатываемого инструмента, т.к. улучшенный сход стружки понижает нагрузку на инструмент.

Более того, теплопроводность ферритных сталей выше, чем у аустенитных сталей, что приводит к меньшему нагреванию инструмента и соответственно к увеличению срока его службы.

Стоит отметить, что низкое упрочнение стружки во время её образования приводит к увеличению её длины, что негативно сказывается на качестве поверхности получаемого изделия и стойкости инструмента, особенно при таких операциях, как сверление. При сверлении длинная стружка очень трудно удаляется из рабочей зоны и часто служит причиной поломки инструмента. При этом риск налипания металла на режущую кромку максимален.

Чтобы избежать перечисленных выше сложностей, ферритные стали, предназначенные под обработку резанием, поставляются, как и стали аустенитного класса, с повышенным содержанием серы.

Мартенситные нержавеющие стали

Высокая теплопроводность и низкая степень холодного упрочнения мартенситных сталей приводит к хорошим результатам при проведении теста $Vb_{15/0,15}$.

Одним из параметров, ухудшающих результаты испытаний, является повышенное содержание в некоторых мартенситных сталях углерода, по большей части присутствующего в виде карбидов, оказывающих абразивное воздействие на обрабатывающий инструмент, сокращая срок его службы.

Данный эффект можно наблюдать на тестах $Vb_{15/0,15}$, проведённых на четырёх мартенситных сталях с одинаковым пределом прочности при растяжении 800 МПа (достигаемом при закалке с отпуском): чем выше содержание С, тем хуже результаты этих тестов (см. таблицу 2).

Еще одним важным параметром, влияющим на обрабатываемость резанием мартенситных сталей, является

	1.4006 ≈12X13	1.4021 ≈20X13	1.4028 ≈30X13	1.4034 ≈40X13
Cr (%)	11.5	12.2	12.1	12.6
C (%)	0.09	0.20	0.30	0.44
Предел прочности (МПа)	785	780	804	800
$Vb_{15/0,15}$ * (м/мин)	320	270	230	215
* Обрабатывающий инструмент Z250 SNMG 120408-95				

Таблица 2. Влияние содержания С на обрабатываемость резанием мартенситных сталей

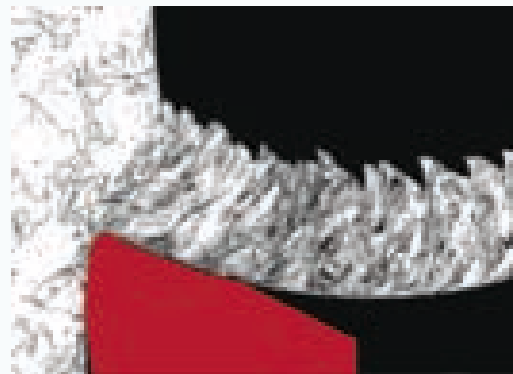
режим их термообработки. Если отпуск проводится при слишком низкой температуре, металл приобретает высокие прочностные свойства, нагрузка при резании будет слишком высокой, износ инструмента увеличенный. И наоборот, если отпуск проводится при очень высокой температуре, металл приобретает низкие прочностные свойства, и налипание металла на режущую кромку может значительно сократить срок службы инструмента.

Пути улучшения обрабатываемости резанием нержавеющих сталей

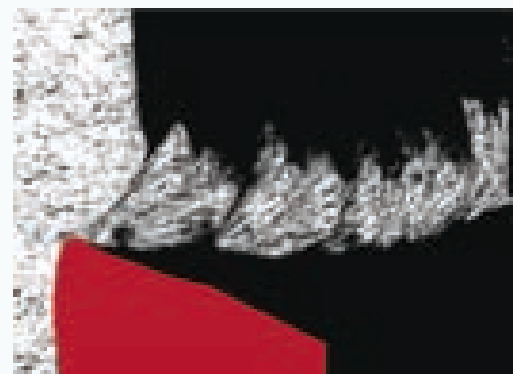
Сульфидные включения – автоматные стали с повышенным содержанием серы

Целенаправленное увеличение содержания серы в стали (обычно в пределах от 0,15 до 0,35%) – широко распространённый метод повышения ее обрабатываемости резанием. Введение в состав стали серы приводит к образованию включений сульфида марганца MnS. Как давно известно, они оказывают положительное влияние на обрабатываемость резанием.

В первую очередь включения сульфида марганца влияют на улучшенный сход стружки (см. рис. 1). Этот эффект достигается благодаря повышенной ломкости



Образование стружки на стали 1.4307 (03X18H11) при токарной обработке



Образование стружки на стали 1.4305 (303) при токарной обработке

Рис. 1. Сравнение формы стружки на двух аустенитных хромоникелевых сталях (18%Cr, 9%Ni): сталь с повышенным содержанием серы 1.4305 (303) обладает лучшим осыпанием стружки, чем сталь 1.4307 (03X18H11)

стружки в непосредственной близости от включений сульфида марганца, которые хорошо деформируются при рабочей температуре резания.⁴

Второй эффект – это повышение стойкости инструмента при одинаковых условиях резания, более высокие результаты теста по методу Vb_{15/0,15} (см. таблицу 3).

	1.4301 08X18H10	1.4301 08X18H10	1.4305 (303)
S (%)	0.005	0.025	0.300
Vb _{15/0,15} * (м/мин)	220	260	350
* Обрабатывающий инструмент Z250 SNMG 120408-95			

Таблица 3. Влияние серы в составе сульфида марганца MnS на обрабатываемость резанием аустенитных сталей

Хорошо известно, что благодаря включениям сульфида марганца между стружкой и инструментом возникает смазывающий слой (см. рис. 2).

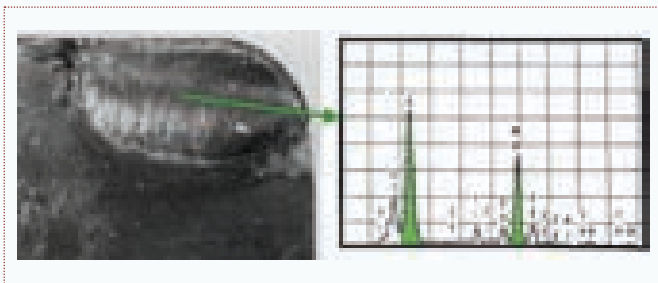


Рис. 2. Проведённое после обработки резанием стандартной стали 1.4305 (303) сканирование инструмента электронным микроскопом показало наличие на инструменте элементов Mn и S, что доказывает, что сульфиды марганца играют роль смазки между стружкой и инструментом

Однако, их присутствие значительно уменьшает коррозионную стойкость, особенно в условиях, вызывающих оспенную коррозию. Более того, повышенное содержание серы понижает обрабатываемость стали в горячем состоянии и свариваемость, так как увеличивается риск горячего растрескивания (в основном на аустенитных сталях). По этой причине металлурги начали поиск других путей по улучшению обрабатываемости резанием.

Благодаря их усилиям в каждом классе нержавеющей сталей (аустенитные, ферритные, мартенситные) были созданы для широко распространённых сталей специальные автоматные модификации с повышенным содержанием серы.

Что касается сталей «дуплекс» (аустенитно-ферритных), то повышение в них содержания серы без значительного ухудшения других свойств представляется затруднительным. Если содержание серы превышает стандартные значения (до 10 ppm), то сильно падает ковкость.

Включения оксидов (стали UGIMA®)

В стандартных нержавеющей сталях (не входящих в семейство UGIMA®) в основном содержатся оксиды алюминия, хрома и кремния (см. рис. 3), которые облада-

ют высокой твёрдостью и хрупкостью и могут приводить к повреждению инструмента во время обработки резанием. Более того, количество оксидов не контролируется, что делает нестабильной обработку резанием стандартных нержавеющей сталей.

В нержавеющей сталях UGIMA® содержатся особые комплексные оксидные включения (рис. 4), обладающие в сравнении с оксидами алюминия, хрома и кремния низкой температурой плавления, что повышает деформируе-

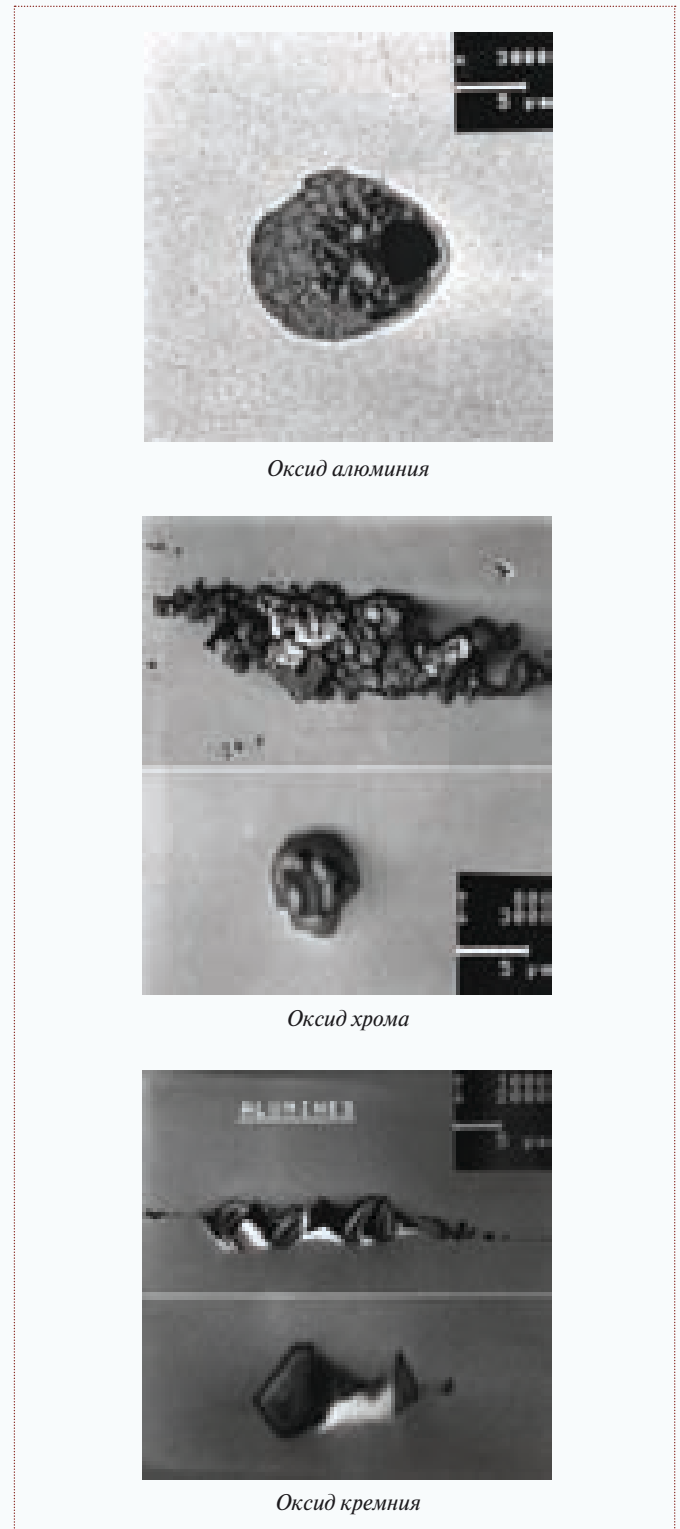


Рис. 3. Пример содержания оксидов в стандартной нержавеющей стали после горячей прокатки; оксиды не деформируются даже при высокой температуре горячей прокатки (1100-1300°C)

⁴ BLETTON O. et Al. *Stainless Steels With Improved Machinability. Development and Applications. 4th Days of Machinability and Cutting Technology, 1989, Tekniker, Eibar (Spain)*

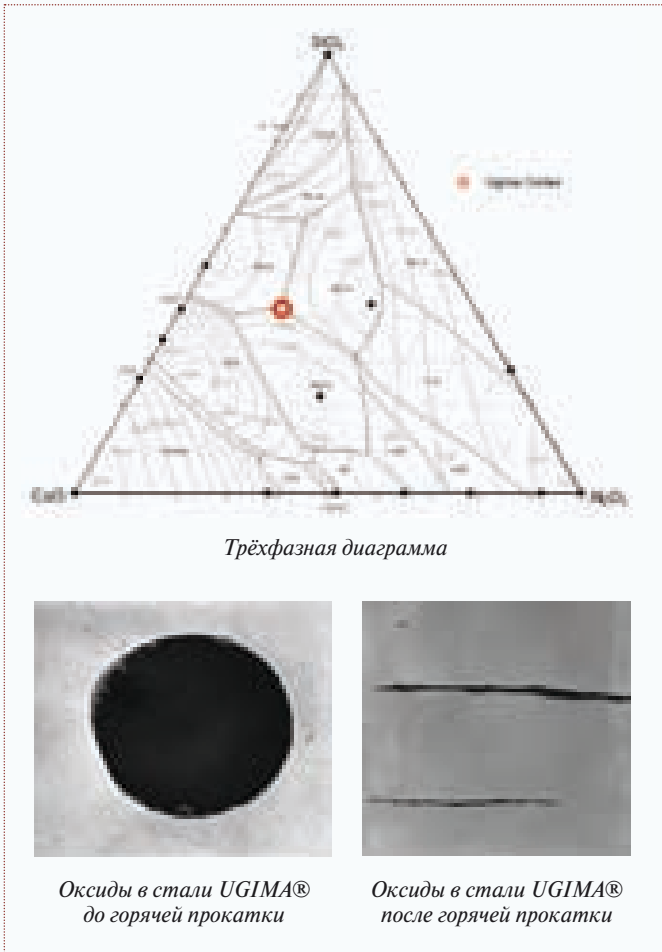


Рис. 4. Химический состав комплексного оксидного включения в сталях семейства UGIMA на трёхфазной диаграмме $CaO-Al_2O_3-SiO_2$; деформируемость включений при горячей прокатке

мость при снятии стружки во время обработки резанием, особенно при высоких скоростях резания.

Замещение стандартных оксидов особыми комплексными в сталях семейства UGIMA® делает обрабатываемость резанием стабильной, т.е. у сталей из разных плавков обрабатываемость резанием находится на одинаковом уровне. Средние значения обрабатываемости резанием лежат на более высоком уровне из-за отсутствия твёрдых оксидов.

Деформируемость комплексных оксидов при температурах резания приводит к улучшенной обрабатываемости резанием по двум причинам. Во-первых, благодаря своей деформируемости при правильно подобранной температуре резания комплексные оксиды выступают в качестве смазки между инструментом и стружкой (см. рис. 5). Во-вторых, комплексные оксиды улучшают осыпание стружки, так как повышают пластичность в направлении образования стружки (см. рис. 6)⁵.

Контроль за комплексными оксидами при производстве сталей семейства UGIMA® не только повышает обрабатываемость резанием, но и продлевает срок службы инструмента благодаря смазывающему эффекту и улуч-

⁵ BLETTON (O.) et Al. *Influence Of Oxide Nature On The Machinability Of 316L Stainless Steels*, 1st International Conference on the Behaviour of Materials in Machining, 1988, Stratford upon Avon, (England)

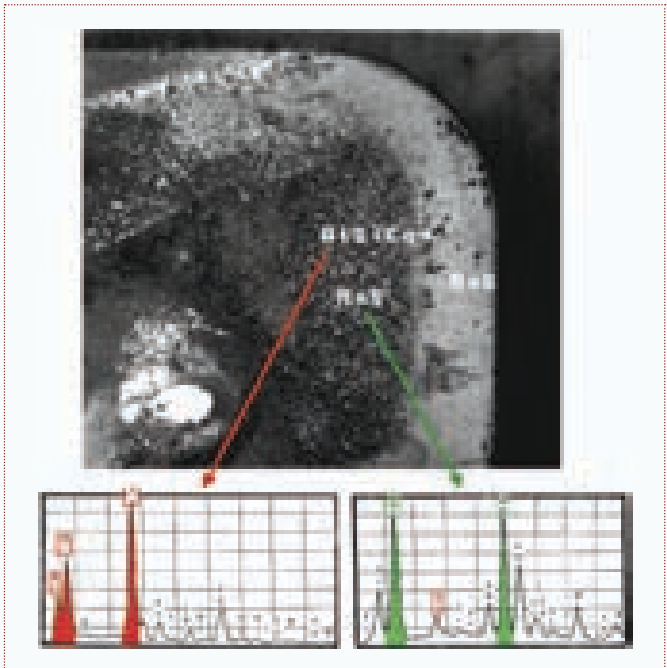


Рис. 5. Проведённое после обработки резанием стали UGIMA® 4305 (303) сканирование инструмента электронным микроскопом показало наличие на инструменте таких элементов, как Al, Ca и Si, а также Mn и S, что доказывает роль смазки у комплексных оксидов в сталях семейства UGIMA® (а сульфидов марганца - для автоматных модификаций сталей с повышенным содержанием серы)

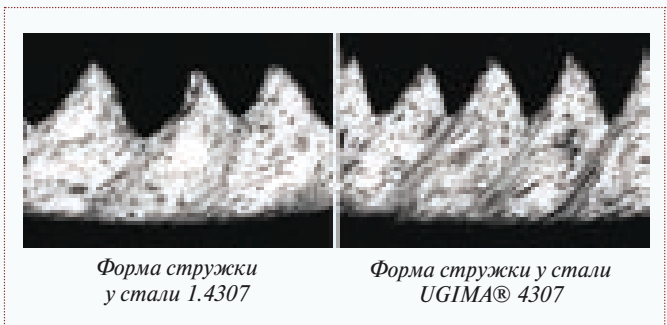


Рис. 6. Сравнение формы стружки у стандартной стали 1.4307 (03X18H11) и её модифицированной версии UGIMA®4307 - стружка на стали в модификации UGIMA® осыпается лучше

шенному осыпанию стружки. На рис. 7 приведены примеры достигаемого повышения производительности.

Более того, комплексные оксиды в сталях семейства UGIMA®, в отличие от сульфида марганца, не оказывают негативного воздействия на другие свойства стали: деформируемость в горячем состоянии, коррозионную стойкость и свариваемость.

Сочетание сульфидов и деформируемых оксидов

В последние несколько лет на базе автоматных нержавеющих сталей UGIMA® были созданы автоматные стали второго поколения UGIMA® НМ, обладающие ещё более высокой обрабатываемостью резанием. Новое поколение автоматных сталей сочетает в себе положительное влияние на обрабатываемость резанием как сульфидов, так и особых комплексных оксидов.

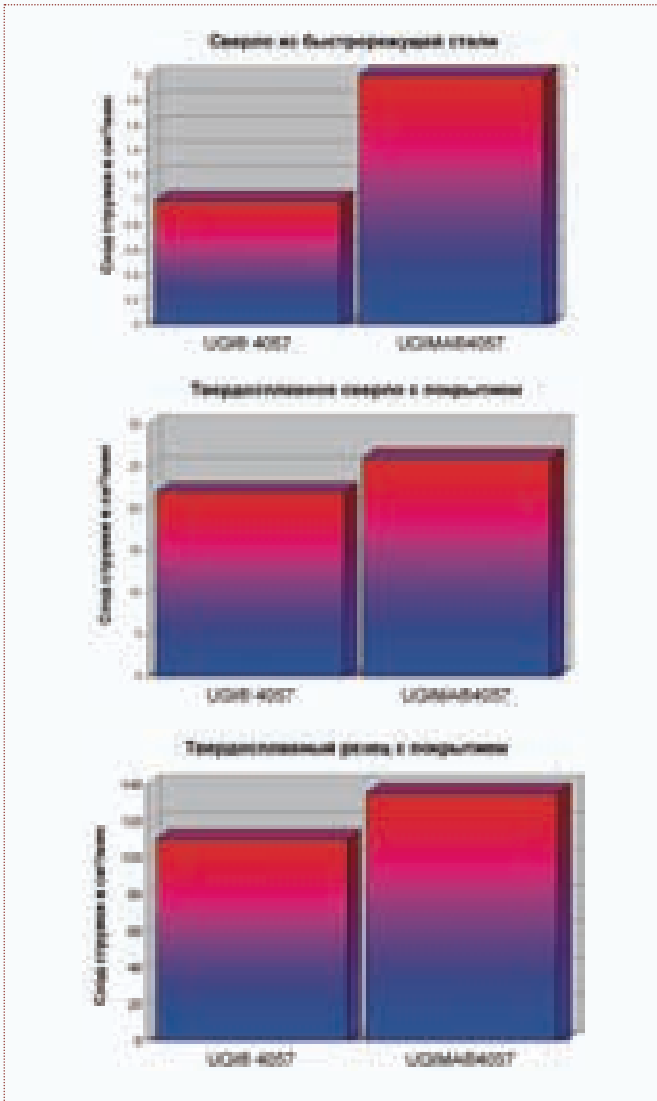


Рис. 7. Примеры повышения производительности (осыпание стружки в см³/мин. при одинаковой стойкости инструмента) на стали UGIMA® 4057 (14X17H2 мод.) по сравнению со стандартной сталью UGI® 4057 (14X17H2) при трёх различных вариантах обработки

На рис. 8 показано развитие стандартной стали 1.4305 до её самой современной модификации UGIMA® 4305 НМ. Благодаря сочетанию положительных эффектов особых комплексных оксидов и сульфида марганца сталь UGIMA® 4305 НМ показывает при токарной обработке результаты, сравнимые с уровнем обрабатываемости стали 303XL, которое имеет повышенное содержание серы.

Заключение

На обрабатываемость резанием нержавеющей сталей могут влиять различные факторы. Конечно, наиболее существенное влияние оказывают прочностные свойства обрабатываемого металла. Степень холодного упрочнения и уровень теплопроводности также имеют большое значение при обработке резанием. Поскольку физиче-

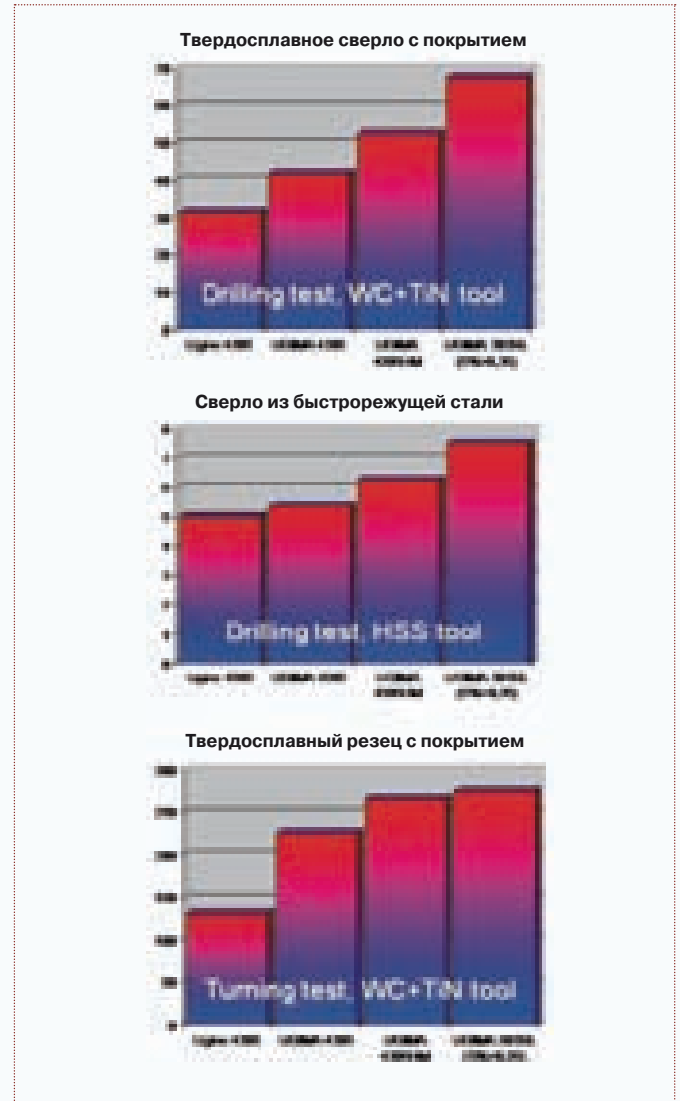


Рис. 8. Уровень обрабатываемости резанием для каждой из модификаций стали 1.4305 (UGI®4305) и сравнение со сталью 303XL

ские свойства стали различаются в зависимости от принадлежности стали к определённому классу: аустенитному, мартенситному или ферритному, — то они, без сомнения, должны учитываться при сравнении обрабатываемости резанием. Физические свойства особенно важны для понимания таких причин, как плохое осыпание стружки или низкая стойкость инструмента.

Более детальное понимание металлургических аспектов позволило найти различные пути к улучшению обрабатываемости резанием: увеличение содержания серы или контролируемое содержание и тип комплексных оксидов, например, в автоматных сталях первого поколения UGIMA® и в сталях второго поколения UGIMA® НМ.

Необходимо дальнейшее проведение исследований, направленных на поиск новых методов повышения обрабатываемости резанием сталей «дуплекс», в которых содержание серы должно всегда находиться на минимальном уровне во избежание проблем с ковкостью.