



УДК 621.77109

**М.З. Певзнер, Ю.Л. Апатов, Д.О. Виноградов,
К.В. Иванов-Польский, Е.А. Куимов**
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
г. Киров, Россия
E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru
Дата поступления: 27.11.2017

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦВЕТНОГО ПРОКАТА

Аннотация

Исследовали влияние геометрии фрез, конструкции станочного оборудования и режима двустороннего фрезерования горячекатаных полос меди и медных сплавов на стойкость фрез, выход годного, производительность и качество, в частности, рельеф фрезерованной поверхности. Предложена модель формирования рельефа поверхности в зависимости от жёсткости технологической системы, режима обработки, а также конструкции и геометрии фрез. Полученные результаты позволили повысить чистоту поверхности, стойкость фрез и производительность, а также уменьшить потери.

Ключевые слова: горячекатаные полосы, фрезерование проката, рельеф фрезерованной поверхности, геометрия фрез.

Введение

Фрезерование заготовки, предназначенной для лентопрокатного производства, широко используется в отечественной и зарубежной практике, поскольку позволяет освободиться от основной массы поверхностных дефектов как литейного происхождения, например, после литья полос [1], так и возникших при горячей прокатке. При этом важно наряду с обеспечением максимально возможных производительности и выхода годного предотвратить появление на поверхности проката новых дефектов, в частности, «заката стружки», особенно характерного для фрезерования мягких материалов. Вообще, качество фрезерованной поверхности, определяющее условия трения при последующей прокатке, её характерный рельеф, обусловленный прерывистостью процесса резания [2, 3] и состоящий из чередующихся «гребешков» и впадин, имеет в этом случае особое значение. Оно, с одной стороны, должно обеспечивать достаточно высокий коэффициент трения захвата полосы в валки прокатного стана, с другой – предотвращать характерный (особенно для мягкого цветного металла) вид брака – «надиры» или «задиры» (ГОСТ 21014-88), обусловленный межвитковым трением при разматывании рулона в

процессе последующей прокатки. Высота «гребешков» относительно впадин h , определяющая шероховатость R_z фрезерованной поверхности, находится из чисто геометрических представлений как функция диаметра фрезы D и расстояния между соседними «гребешками» L , откуда видно, что с увеличением L высота гребешков увеличивается параболически:

$$h = L^2 / 4D \quad (1)$$

Следует отметить, что исследования этого процесса применительно к прокату имеют весьма ограниченный характер [4]. Между тем фрезерование проката принципиально отличается от фрезерования жёстко закреплённой в приспособлении детали – оно характеризуется менее жёсткой технологической системой связи: станок-приспособление-инструмент-деталь («система СПИД») [5]. Действительно, место закрепления полосы и место её обработки в этом случае может разделять многометровое расстояние. Это должно определять не только рельеф фрезерованной поверхности, но и стойкость инструмента, а также его оптимальную конструкцию, в частности углы резания, наконец, оптимальные режимы резания полос из различных материалов [6]. Целью настоящей работы была комплексная оптимизация процесса фрезерования с

учётом обеспечения эффективной последующей прокатки.

Методика проведения работы

Предметом исследования была линия двустороннего фрезерования, состоящая, в частности, из правильно-размоточной машины, тянущих роликов с последующей правильной машиной, относительно жёстко связанных с обрабатываемой полосой, ножниц, станков «встречного» [2, 3] фрезерования верхней и нижней сторон полосы и свёрточной машины (рисунок 1). На Кировском заводе ОЦМ она предназначена для обработки полос меди, латуни, бронзы и медно-никелевых сплавов, таблица 1.



Рисунок 1. Общий вид линии двустороннего фрезерования

Таблица 1.

Технологические характеристики линии двустороннего фрезерования

Характеристики заготовки - горячекатаных полос	
толщина	7-14 мм
ширина	500-750 мм
внутренний диаметр рулона	480-550 мм
внешний диаметр рулона	800-1500 мм
масса рулона	до 5 т
σ_b	260-350 МПа
δ	20-56%.
Характеристика обработанного рулона	
ширина полосы	492-742 мм
наружный диаметр	800-1500 мм
внутренний диаметр	480-550 мм

В качестве инструмента традиционно используются сборные цилиндрические

фрезы диаметром ~250 мм с 14 винтовыми ($\omega = 25^{\circ}53'$ град) зубьями (рисунок 2) [3]. Они «набираются» из пластин Р6М5, а затем затачиваются по заднему α и переднему γ углам. Для контроля углов заточки с целью их оптимизации был выбран угломер 2УРИ по ТУ2-034-617-84, и проводилось обучение работников завода методике его использования. Несмотря на существенную погрешность ($\pm 20'$) прибор имеет ряд преимуществ: специализирован для контроля фрез, а поправка на количество зубьев фрезы вводится непосредственно на самом приборе, доступном в производственных условиях, малогабаритном и относительно дешёвом. Углы варьировали в достаточно широких пределах: $\alpha = 8^{\circ} - 13^{\circ}$, $\gamma = 1^{\circ} - 12^{\circ}$, контролируя стойкость фрез и качество обработанной поверхности. Дополнительно изготавливали фрезы с количеством зубьев 7 или 2 вместо 14, для чего из фрез вынимались «лишние» зубья².



Рисунок 2. Фреза в сборе

Варьировали режим обработки: скорость вращения фрезы n (об/мин) и скорость движения полосы, «минутную подачу» S_M , (м/мин), величину углов заточки фрезы α и γ , толщину съёма (в пределах 0,25-0,6 мм на сторону). Рассчитывали подачу на оборот S_O и подачу на зуб S_Z , которая в соответствии с классической теорией резания [2, 3] должна быть равна расстоянию между «гребешками» L на образующей фрезерованной поверхности (2):

$$S_Z = S_M / (n \times Z) = S_O / Z = L, \quad (2)$$

где: S_M - скорость движения полосы, «минутная подача» (м/мин),

n - скорость вращения фрезы (об/мин),

Z - количество зубьев.

² В работе участвовал Вотинцев Ю.М.

С учётом радиуса фрезы ($R \approx 125 \text{ мм}$) оценивали теоретическую высоту гребешков h (см. формулу 1), определяющую «склонность» к образованию «надигов». При том, что расчётная высота, не учитывающая пластическую деформацию при резании, несколько завышает фактические значения высоты h_f , очевидна необходимость ограничения величины L в случаях, когда на поверхности проката наблюдаются надирь. Контролировали фактическое расстояние между соседними гребешками L_f и качество фрезерованной поверхности в целом, стойкость фрез, выход годного при обработке различных материалов и производительность.

Для оценки влияния усилия резания, жёсткости технологической системы и числа зубьев фрезы на рельеф поверхности на универсальных горизонтально-фрезерных и специализированных станках для фрезерования многотонных слитков обрабатывали цилиндрическими фрезами с числом зубьев $Z=6^3$ и $Z=22$ плоскую поверхность из цветного сплава. Варьировали усилие резания от минимального при минимальной толщине снимаемого слоя ($\sim 0,02 \text{ мм}$) до максимально возможного при толщине слоя (при фрезеровании слитков) до 10 мм , а также жёсткость закрепления обрабатываемого материала. Для моделирования минимальной жёсткости системы деталь закрепляли с использованием упругой прокладки.

Модернизировали конструкцию «проводки», установленной в станке фрезерования верхней стороны полосы, рисунок 3, и оценивали эффективность разных вариантов её конструкции, в частности, в предотвращении образования дефекта «закат стружки».



Рисунок 3. «Проводка» в исходном состоянии

Результаты исследования

При переходе от обработки полос одного сплава к другому замена инструмента не производится вследствие её трудоёмкости и ограниченности инструментального парка. Поэтому выбранные углы заточки фрезы должны в достаточной степени подходить всем обрабатываемым сплавам. Обследование углов заточки фрез, используемых к моменту проведения работы, показало: $\gamma = 9-10^\circ$, $\alpha = 8-9^\circ$. Но по различным данным, при обработке цветных металлов цилиндрическими фрезами со вставными ножами задний угол должен составлять $\alpha > 10^\circ$. В противном случае, а также при сильном износе фрезы, когда вблизи режущей кромки $\alpha \approx 0^\circ$ в процессе резания происходит «затираание» по задней грани, катастрофически быстрый износ фрезы. В нашем случае предельный угол, при котором уже возможно повреждение заточным кругом соседнего зуба, составлял $\alpha \approx 13^\circ$. Таким образом, с учётом погрешностей обработки и контроля нами рекомендован оптимальный задний угол $\alpha = 11-12^\circ$. Из опробованных нами передних углов максимальную стойкость показали фрезы с углами $\gamma = 1-4^\circ$. Надо полагать, что значение оптимального, в частности, переднего угла зависит от режима фрезерования и установление этой зависимости требует дополнительных широких и долгосрочных исследований.

«Закат стружки» был практически прекращён в результате модернизации «проводки», позволившей гарантировать интенсивный воздушный поток, сдувающий стружку, и заменившей трение скольжения при движении полосы на трение качения (замена втулки на подшипники). Этому способствовало также использование в качестве смазочно-охлаждающей жидкости веретённого масла.

В результате проведённых работ рекомендовано уменьшение толщины снимаемого слоя при удовлетворительной планшентности полосы вплоть до $0,25 \text{ мм}$. Наряду с повышением выхода годного это

³ В работе участвовали Шадрин В.А., Хаитов К.Е.

предотвратило случаи превышения предельно допустимой нагрузки двигателя, которые ранее периодически имели место при обработке сварных рулонов в районе шва. Уменьшение толщины съёма также способствовало устранению дефекта «закат стружки», так как образующаяся при этом стружка меньшего размера (рисунок 4) лучше удаляется пневмосистемой. Заметим, что при этом она также лучше брикетуется (рисунок 5), что весьма важно, так как транспортировка и удаление небрикетированной стружки достаточно затруднительны.



Рисунок 4. Медная стружка в зависимости от толщины снимаемого слоя: 0,25 мм слева и 0,5 мм справа



Рисунок 5. Брикеты латунной стружки

Видно, что при фрезеровании по традиционно используемым режимам № 1 и №2 (табл. 2) расстояние между гребешками равно не подаче на зуб S_z , а подаче на оборот S_o :

$$L = S_o = S_M / n \quad (3)$$

При часто используемом на предприятии уменьшении расстояния между гребешками L за счёт уменьшения скорости

подачи S_M величина L , (как и S_o), естественно, уменьшается, но это связано и с соответствующим уменьшением производительности труда (режим № 3), то есть этот режим не может быть принят как основной. Уменьшение количества зубьев в 2 раза ($Z = 7$) при тех же традиционных режимах хотя и не привело к выполнению (2), но всё же «приблизило» L к S_z (режим № 4). Наблюдается на первый взгляд необъяснимое явление: вместо ожидаемого в соответствии с чисто геометрическими представлениями увеличения L «прореживание» зубьев привело к его уменьшению. Видно, что L стало занимать промежуточное положение: $S_z < L < S_o$. (Дальнейшее уменьшение количества зубьев до $Z = 2$ приводило к выполнению $L = S_z$ (2), но качество фрезерованной поверхности становилось неудовлетворительным, т.к. оно стало в большей степени зависеть от профиля каждого из оставшихся зубьев).

Места крепления больших слитков при фрезеровании со значительным съёмом на сторону и большими нагрузками (табл. 3, режимы 1-3) также расположены достаточно далеко от места обработки. Видно, что здесь $S_z < L < S_o$. При минимальном съёме и минимальной нагрузке (№ 4 и №5) в соответствии с условием (2) выполняется: $L = S_z$. Наоборот, в условиях «мягкой» технологической системы и существенной нагрузки наблюдается другая «крайность»: за счёт использования упругих прокладок при креплении детали и достаточно значительного съёма реализуется свойственное традиционным режимам в линии фрезерования полос (см. табл. 2, режимы №1-2) $L = S_o$ (№ 6).

Таблица 2

Результаты расчёта подачи на зуб S_z в сравнении с фактическими значениями «расстояния между гребешками» L при обработке полос в линии фрезерования по традиционно используемой (режимы № 1-2) и опытным технологиям

№	Обрабатываемый материал	n, об/мин	S_M , м/мин	Z	$S_o = S_M / n$, мм	S_z , мм	L, мм
1	медь, простые латуни, ЛМц58-2	800	8	14	10	0,71	~ 10
2	сплавы МН-19, МНМц50-10-5	600	6	14	10	0,71	~ 10
3	медь, простые латуни, ЛМц58-2	800	4	14	5	0,36	~ 5
4	латунь Л63	800	8	7	10	1,43	~ 5

Результаты расчёта и фактические значения расстояния между гребешками L_{Φ} , получаемые при обработке латуни на специальных и универсальных горизонтально-фрезерных станках слитков и брусков в реально используемых и моделируемых технологических процессах при наличии в крепеже детали специально установленных упругих элементов (У) или при их отсутствии (О)

Характеристика станка и материала	№	Δh , мм	n, об/мин	S_M , мм/мин	S_O , мм	У/О	z	S_Z , мм	L_{Φ} , мм
Специальные станки, слитки латуни длиной до 5,5 м	1	~ 2	1540	40000	25,97	О	22	1,18	5...7
	2	~ 2	1410	25000	17,73	О	22	0,81	"
	3	~ 2	1580	30000	18,99	О	22	0,86	"
Универсальные станки, латунные бруски массой до 1 кг	4	~ 0,02	31,5	1600	50,79	О	6	8,47	8...9
	5	~ 0,02	63	1600	25,396	О	6	4,233	~4
	6	~ 0,3	63	315	5	У	6	0,833	~5

Обсуждение результатов

Расстояние между гребешками, наблюдаемое после обработки по традиционным режимам (см. №№ 1-3, табл. 2), противоречит чисто геометрическим представлениям, по которым каждый следующий зуб должен оставлять на полосе след на строго одинаковом расстоянии S_Z от предыдущего. Отклонения от этого отмечаются лишь в случае явления «подхватывания» при попутном фрезеровании [2, 3]. Единственное объяснение данного явления, по нашему мнению, можно дать лишь на основе представлений об упругих деформациях технологической системы [4]. Обрабатываемая полоса относительно жёстко связана лишь с правильной машиной и, в меньшей степени, с роликами фрезерегатов. Кроме пластической деформации в зоне резания вся полоса между точками закрепления и обработки подвергается действию

сложно распределённых напряжений. В результате значительного взаимного удаления вышеуказанных точек закрепления при тех же усилиях резания суммарные упругие деформации здесь особенно велики. В этом случае процесс представляется следующим образом. Очередной винтовой зуб ещё находится в «зацеплении» с обрабатываемой полосой, когда следующий за ним зуб входит в зацепление и, следовательно, «скребёт» полосу практически в том же месте. И так далее до тех пор, пока напряжения в технологической системе за счёт непрерывного наматывания обработанной полосы не достигнут столь значительных величин, что фреза относительно полосы перескочит (провернувшись) на довольно значительное расстояние, которое и равно L . Дальше процесс последовательной обработки несколькими зубьями в одном месте полосы продолжается до следующего

«скачка» (проворота) фрезы относительно полосы и т. д.

Исходя из этой модели, можно объяснить, почему в достаточно широком диапазоне режимов обработки выполняется $L = S_0$. Естественно полагать, что скачок происходит в момент, когда усилия напряжения в технологической системе превысят силы сопротивления сдвигу фрезы относительно полосы, то есть когда, с одной стороны, упругие напряжения достигают достаточной величины, с другой - когда сопротивление этому скачку минимально. Фреза устанавливается на шпиндель с определённым эксцентриситетом и, следовательно, из 14 зубьев один врежется в полосу наиболее глубоко, другой, расположенный напротив первого, - наименее глубоко. Судя по нашим результатам ($L = S_0$, см. таблицу 2), момент превышения усилия напряжения над силами сопротивления сдвигу фрезы наступает в единственном положении, повторяющемся через 14 зубьев. Понятно, что наиболее вероятен скачок полосы в момент, когда вследствие своего биения фреза максимально приподнята над обрабатываемой полосой, в результате чего сопротивление её скачку минимально.

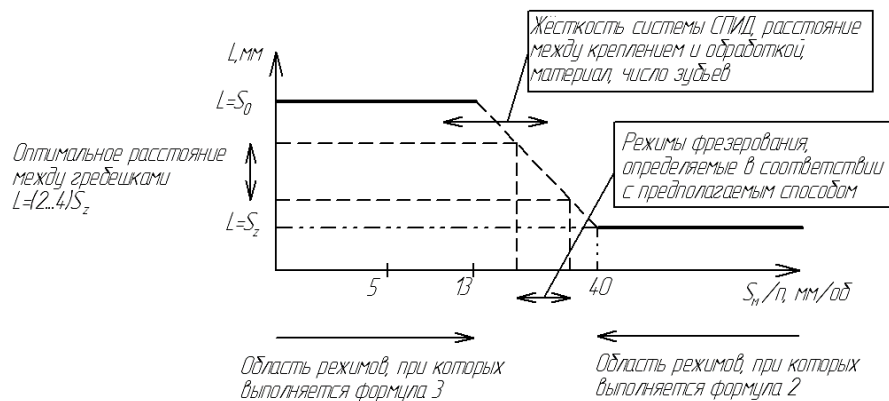
При редком расположении зубьев (см. табл. 2, режим 4) предыдущий (вышедший из «зацепления») зуб уже не находится в «зацеплении», не задерживает проворота фрезы при нарастании упругих напряжений и скачок происходит раньше завершения полного оборота. Было сделано предположение, что замедление вращения фрезы должно дать эффект, сходный с эффектом от «прореживания» зубьев. То есть при относительно малых оборотах фрезы упругие напряжения должны достигать максимальных значений, достаточных для скачка, раньше завершения полного оборота. Как показали результаты наших дополнительных исследований для $S_M/n = 13,3 - 40$ мм/об, при уменьшении n первоначально соотношение $L = S_0 = 13,3$ сохраняется (табл. 4, режим 1). Но дальнейшее уменьшение n (увеличение соотношения S_M/n)

приводит на первый взгляд к парадоксальному явлению: к образованию принципиально иного рельефа фрезерованной поверхности. Процесс, наблюдаемый в диапазоне $n=200-400$ об/мин, можно охарактеризовать как «разбиение» одной большой исходной впадины размером L на промежуточные впадинки и общее выравнивание профиля. Следует отметить, что большие исходные впадины не исчезают совсем, а сохраняются в виде чуть заметных по высоте волн, каждая из которых по-прежнему равняется по длине $S_0 = S_M/n$. Таким образом, явления последовательной работы в одном месте полосы 14 зубьев, как показали наши исследования, можно избежать при увеличении соотношения S_M/n . Рельеф полученной поверхности складывается из мелких впадин и волн, но весь он по высоте много меньше, чем исходная впадина между гребешками, например, при $L=10$ мм. Видно, что с уменьшением n L (длина вновь образовавшихся впадин) всё ближе приближается к S_Z и лишь при $n=200$ ($S_M/n = 40$ мм/об) сравнивается с S_Z , то есть только в этом случае начинает выполняться формула (2). Таким образом, соотношение S_M/n - один из главных факторов, определяющих характер образующегося рельефа поверхности, и его влияние на L достаточно условно представлено на схеме (рис. 6). Видно, что зависимость $L = f(S_M/n)$ можно представить в виде диаграммы, состоящей из горизонтальных участков: $L = S_0$ и $L = S_Z$, а также из некоего промежуточного участка, представленного условно в виде пунктирной линии.

Таблица 4

Результаты расчёта подачи на зуб S_z в сравнении с фактическими значениями «расстояния между гребешками» L при обработке полос,двигающихся со скоростью $S_M = 8$ м/мин, в линии фрезерования по режиму, характеризующемуся увеличенной подачей на оборот ($S_0 = S_M/n = 13-40$ мм/об) фрезой с числом зубьев $Z = 14$

№	Обрабатываемый материал	Z	$S_0 = S_M/n$, мм/об	S_z , мм	L, мм
1	Л63	14	13,(3)	0,95	~ 13
2	Л63	14	20	1,43	~ 5
3	Л63, ЛМц58-2	14	26,(6)	1,90	4-5
4	Л63	14	40	2,86	~ 3

Рисунок 6 Влияние режима фрезерования (соотношения S_M/n) на L

Производили обработку по различным режимам до полного износа фрез. При фрезеровании по традиционно используемым режимам №1 и №2, см. таблицу 2, поверхность полосы была достаточно грубой. В результате последующей обработки (холодной прокатки на трёхклетевом стане до размера 1,8 – 2,0) на поверхности ленты обнаруживались надирь. Прокатка осуществлялась в эмульсии, но в месте образования надиров при разматывании рулона фрезерованной полосы имеет место «сухое» трение, а для его предотвращения потребовалось бы вводить дополнительную предварительную технологическую операцию промасливания фрезерованной полосы.

Выполнение соотношения $L = S_z$ (см. таблицу 4 режим 4), привело к необходимости соблюдения особых требований к качеству фрез и, как следствие, к частой их замене. Действительно, в этом случае каждый зуб обрабатывает отдельную впадину, а дублирование его работы следующим по окружности фрезы зубом не осуществляется. В результате фрезерованный профиль

стал в точности отражать дефекты обрабатываемого инструмента, например, «выкрашивание» зуба или естественный зазор между режущими пластинами.

Наименее рельефный профиль поверхности и одновременно наибольшая стойкость фрез обнаружена при работе по режимам, характеризующимся промежуточными значениями S_M/n (№№ 2, 3, см. таблицу 4). Уже первой парой фрез было отфрезеровано: 2 рулона меди, 2 – Л63, 4 – МНМц50-10-5, 16 – ЛМц58-2, что существенно больше нормы обработки между переточками. Если ранее замену фрез осуществляли 1-2 раза в смену, то при переходе на режимы №№ 2, 3 (см. таблицу 4) замену производят в среднем не чаще 1 раза в сутки при трёхсменной работе линии фрезерования. Дефекты «надирь» на поверхности ленты, прокатанной из полос, отфрезерованных по новым режимам, при этом не обнаруживались.

Заключение

1. Форма профиля поверхности фрезерованной полосы, определяемая законо-

мерностью расположения и параметрами формы образуемых зубьями фрезы «гребешков» и впадин, не соответствует представлениям классической теории резания металлов.

2. Причинами невыполнения формулы определения «подачи на зуб» являются значительные упругие деформации, обусловленные особенностями конструкции и малой жёсткостью технологической системы, свойственными линиям непрерывного фрезерования проката.
3. Профиль фрезерованной поверхности может регулироваться в зависимости от соотношения скорости подачи полосы и скорости вращения фрезы, радиального биения зубьев фрезы и их количества, толщины снимаемого слоя и усилия резания, а также жёсткостью технологической системы.
4. Оптимальное сочетание минимальной шероховатости фрезерованной поверхности и максимальной стойкости инструмента может быть достигнуто при условии, когда работа формирующего впадину зуба дублируется несколькими следующими расположенными по окружности фрезы зубьями.
5. Применительно к конкретной линии фрезерования модифицирована конструкция фрезагрегата, оптимизированы углы резания и разработаны режимы обработки, обеспечившие:

- повышение стойкости инструмента,
- уменьшение шероховатости поверхности,
- повышение производительности.

Библиографический список

1. Дукмасов В.Г., Ильичев В.Г. Эффективность современных технологий в металлургии: под ред. Г.П. Вяткина. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 178с.
2. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
3. Банников Е.А. Справочник фрезеровщика. Ростов н/Д.: Феникс, 2005. 320 с.
4. Певзнер М.З. О режимах фрезерования и рельефе поверхности фрезерованных полос // Производство проката. 2008. № 9. С. 24-26.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т.: под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001.
6. Барановский Ю.В., Брахман Л.А., Гдалевич А.И. Режимы резания металлов: Справочник: под ред. А.Д. Корчемкина. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
7. Справочник инструментальщика. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.

Information about the paper in English

**M.Z. Pevzner, Yu.L. Apatov, D.O. Vinogradov,
K.V. Ivanov-Polsky, E.A. Kuimov**

Federal State Budgetary Educational Institution of
Higher Education «Vyatka State University»
(FSBEI HE «VyatSU»)
Kirov, Russian Federation
E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru
Received 27.11.2017

ON THE IMPROVEMENT OF THE NON-FERROUS ROLL STRIP MILLING

Abstract

The authors looked at the effect produced by the mill geometry, the design of the machine and the process of two-sided milling of hot-rolled strips made from copper and copper alloys on the durability of mills, recovery, output rate and quality (in particular, on the topography of the milled surface). The authors propose a model for creating a surface profile depending on the adaptability of the system, the machining mode, as well as on the mill design and geometry. The results obtained helped improve the surface finish, the durability and the efficiency of mills and reduce losses.

Keywords: hot-rolled strips, rolled steel milling, topography of the milled surface, mill geometry.
