

УДК: 656.6

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.94>

## ТЕПЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛА

**А.В. Винцов**

*АО «Судостроительный завод «Вымпел», г. Рыбинск, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-8575>*

**Е.Г. Бурмистров**

*Волжский государственный университет водного транспорта,*

*г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>*

*Аннотация. В статье описывается состояние листов металла в процессе плазменной резки. Также в тексте приведена исходная зависимость величины деформаций от длины листового металла  $L$ , ширины реза  $H$ , и скорости резки  $v$ . Далее из этой формулы выведена новая зависимость величины деформации от силы тока, напряжения, а также свойств материала. В конце статьи обозначены некоторые способы борьбы с возникающими при плазменной резке тепловыми деформациями листа металла – такие, как устранение напряжённого состояния листов металла, отношение линейных размеров детали к её толщине; рассказано о приёме закрепления листов металла к раскройному столу, уменьшение отходов после резки, влияние скорости резки на тепловые деформации, положение листа в процессе резки и равномерный нагрев листа.*

*Ключевые слова: остаточные деформации, упрочнение металла, напряжённость листа металла, коробление металла, равномерный нагрев, толщина листа, ширина реза.*

### Введение

По плазменной резке сделано очень много исследований, но мы всё-таки решили изучить, какой будет зависимость конечных деформаций при резке и как она будет зависеть от основных параметров плазморезательной машины. Для этого мы попытаемся вывести приблизительную зависимость конечных деформаций от параметров станка.

Также для устранения деформаций более развёрнуто рассмотрятся способы борьбы с ними и предложены некоторые решения ситуаций с деформациями, возникающие на производстве.

Рассматриваются типичные случаи, которые могут возникнуть и решения, которые ранее были сделаны в этих ситуациях, но могут быть и другие решения – это уже на усмотрение читателя данной статьи.

### Основная часть

При плазменной резке листы металла, как правило, теряют свою устойчивость и детали, полученные в процессе плазменной резки, могут иметь остаточные напряжения, появляющиеся при тепловой обработке металла [1]. Т.к. резка является обратным сварке процессом, то и деформации, которые приобретают детали после этого процесса будут не сжимающие, а, как мы полагаем, растягивающие (рис. 1).

Т.к. кромка обрезана в процессе тепловой обработки и неравномерного нагрева, то она, как правило, может быть ещё и закалена. В связи с этим и возникают не очень значительные деформации, иногда называемые короблением. После начала резки, когда только начинается деформация кромок, происходят небольшие перемещения листа, т.к. детали отделяются от него. При этом размеры отрезанной детали после резки и после её полного остывания не совпадают с размерами, заданными программой.

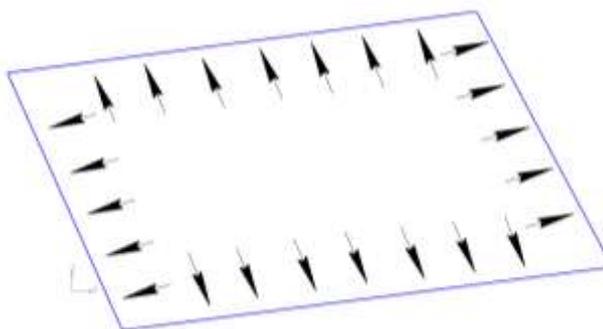


Рис. 1. Растягивающие напряжения после процесса плазменной резки

Величина этих конечных деформаций, полученных при тепловой резке, пропорциональна квадрату длины листового металла и тем больше, чем меньше его ширина и скорость резки при прочих равных условиях, т.е. если деформации, получаемые при резке  $\delta$ , длина листового металла  $L$ , ширина реза  $H$ , скорость резки  $v$ , то пропорциональность имеет вид:

$$\delta \sim L^2 / vH,$$

если скорость заменить по формуле  $v = \ell/t$ , где  $\ell$  – длина реза, а  $t$  – время резки, то будем иметь

$$\delta \sim L^2 t / H \cdot l,$$

Пропорциональность более простая, к тому же все параметры известны: их выдаёт машина в картах раскроя. Для получения равенства необходимо ввести некоторый коэффициент.

Примем  $k$  за некоторый коэффициент пропорциональности для получения равенства, тогда

$$\delta = kL^2 t / H \cdot l.$$

В процессе плазменной резки происходит несколько фазовых изменений в металле это

- его нагрев до температуры плавления;
- само плавление;
- испарение (последующий выдув металла из реза).

Температура в процессе плазменной резки меняется в довольно широком диапазоне: от нормальных температур до  $\sim 10\text{--}30^\circ\text{C}$  до температуры плавления и испарения металла (Температура кипения железа  $3000^\circ\text{C}$ ). В процессе плазменной резки в следствии этого происходит ряд превращений.

Для определения зависимости конечных деформаций от силы тока и напряжения воспользуемся законом Ома и формулой для определения сопротивления проводника:

$$I = U/R, R = \rho l/S,$$

и сделаем небольшое допущение, а именно рассмотрим лист металла как проводник прямоугольного сечения,

$$l = US/I\rho, U = I\rho l/S,$$

а его длину  $l$  сделаем равной длине реза  $L$ , тогда подставив эти равенства получим  $l = US/I\rho$ , и также  $\delta = kL^2 t / H \cdot l$ , выражение для зависимости величины конечных деформаций от силы тока и напряжения:

$$\delta = kL^2 I\rho t / HUS.$$

Если машина вырезает фигурные детали, необходимо учитывать, что тепловые деформации незначительно, но увеличивают ширину реза, так как при вырезании фигурных деталей скорость станка несколько ниже, чем при движении по прямой и для того, чтобы детали точно соответствовали указанным размерам, необходимо учитывать эти незначительные тепловые деформации.

При плазменной резке существует несколько способов борьбы с деформациями, возникающими при тепловой обработке металла:

1. Устранение напряжённого состояния листов металла перед резкой. Для удаления внутренних напряжений, полученных после изготовления листа, обычно применяют термические методы для их устранения.

На графике можно увидеть, что прочность металла интенсивно увеличивается вначале, затем при возрастании деформаций механические свойства увеличиваются незначительно. С возрастанием степени деформации предел текучести меняется быстрее временного сопротивления. С увеличением температуры образовавшихся зёрен становится больше. При повышении температуры нагрева диаметр рекристаллизованных зёрен увеличивается. Первичная рекристаллизация полностью убирает наклёп, полученный пластической деформацией.

Металл становится более ровным, с минимальным количеством дефектов, образованных кристаллическим строением. Свойства металла после рекристаллизации похожи на свойства отожжённого металла.

При удалении внутренней напряжённости от пластических деформаций, происходящих при необратимом перемещении атомов на незначительные расстояния от начальных положений равновесия, изменяется ряд свойств, например, увеличивается прочность и пластичность, а также нейтрализуется влияние концентраторов напряжений.

Упрочнение металла при деформировании показывает кривая Бочвара-Одинга (рис. 2).



Рис. 2. График зависимости плотности металла от плотности дефектов

Деформация приводит к повышению плотности дислокаций в металле.

Рекристаллизационный отжиг с последующим фазовым переходом металла в несколько другое состояние поможет снять напряжения после холодной пластической деформации.

Температура рекристаллизации будет определяться по формуле:  $T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл}$ .

Коэффициент  $\alpha$  будет зависеть от чистоты металла и степени его пластической деформации. При технической чистоте металла  $\alpha$  будет равна 0,3...0,4, но будет снижаться с возрастанием степени деформации. Если уменьшить количество примесей, то  $\alpha$  снизится до 0,1...0,2. В твёрдых растворах  $\alpha$  достигает 0,5...0,6, а в растворенных тугоплавких металлах – 0,7...0,8. Температурный порог рекристаллизации для каждого металла свой, например, для алюминия 100 °С, меди 270 °С, а для относительно чистого технического железа 450 °С. Горячее деформирование обычно производится при температуре немного выше температуры рекристаллизации данного металла, чтобы снять полученный наклёп одновременно проведя рекристаллизацию. Если этого не произойдёт, то наклёп будет частично или полностью сохранен.

Горячая деформация используется для обработки трудно деформируемых, а также мало пластичных металлов и сплавов.

Более качественной является холодная деформация. Она даёт большую точность размеров и улучшает качество поверхности деталей.

Это применяют для листов, не подвергавшихся предварительной термической обработке [2].

2. Отношение линейных размеров детали к её толщине. Чтобы получился более равномерный прогрев деталей, и они были менее подвержены деформациям, выгодно, чтобы отношение линейных размеров к толщине детали было как можно меньшим.

Если принять  $\delta$  – за толщину детали, а  $L$  – за её длину,  $H$  – за ширину, то можно вывести отношение линейных размеров как  $(L + H) / \delta$  или  $L / \delta + H / \delta$ . Нам нужно, чтобы это отношение стремилось к 0,  $\delta$  не может стремиться к 0, т.к. стоит в знаменателе дроби, следовательно,  $L$  и  $H$  должны стремиться к 0.

3. Также применяется приём закрепления листа металла к раскройному столу струбцинами и другими приспособлениями для сохранения его неподвижности. Для фиксации деталей относительно листа применяются технологические приёмы непрерывной резки с разрезанием оставленных перемычек и мостиков после полного остывания листа металла. Чтобы избежать смещения участков от заданной линии реза в них во время обрезки вставляют клинья.

Деформации листа металла и заготовок, полученных из него, будут иметь зависимость от величины внутренних напряжений, возникающих в области около горелки и сильном неравномерном её нагреве относительно всей поверхности листа. Значение величин этих напряжений, имеющих место в металле, будет похоже на сварочные, и будет сочетаться с изменением температурного поля, значением температуры и градиента её изменения в следовании по линии реза и перпендикулярно ей, а также будет зависеть от жёсткости разрезаемого листа стали. Т.к. напряжения, образующиеся в листе металла в процессе резки, в области, находящейся непосредственно возле головки резака, лежат в рамках или превышают предел текучести разрезаемого металла, то даже небольшая пластическая деформация будет давать остаточные деформации и напряжения.

При изготовлении деталей из толстолистовой стали мы будем иметь дело с изгибающими деформациями; а при резке тонколистовой стали также учитывается коробление самой плоскости листа.

Можно перечислить лишь некоторые из причин, по которым не удастся выработать общих мер для устранения деформации металла:

- 1) размеры и форма получаемых деталей весьма различна;
- 2) детали вырезаются по всей плоскости листа;
- 3) параметры при резке могут значительно отличаться (количество деталей, толщина листа и другие).

В обрабатываемом на станке с ЧПУ листе металла вследствие неравномерного нагрева и охлаждения в процессе резки могут возникать деформации, и он начнёт передвигаться на опорах стола раскроя. Шаблон, по которому вырезают деталь, будет зафиксирован на станке и останется неподвижным. И поэтому размеры готовой детали немного могут отличаться от размеров чертежа. Чертежные размеры и размеры детали будут похожи, если рабочий направит горелку строго по линии шаблона, независимо от того совпадает она или нет.

Длинные узкие полосы деформируются обычно пропорционально квадрату их длины ( $\sim L^2$ ). Такие полосы лучше отрезать в первую очередь, расположив их у края листа, дабы избежать сильной деформации.

Данные факторы влияют на величину деформации, и обычно учитываются в общих рекомендациях по снижению величины остаточной деформации в процессе газовой резке [3].

4. С уменьшением отходов после резки. Наименьшие деформации можно получить, если резать детали, сопоставимые с площадью заготовки для вырезаемой детали, т. к. при такой обработке наибольшие деформации будут иметь отходы листа, а не вырезанные детали.

При точной вырезке деталей желательно, чтобы у обрезков была большая подвижность, нежели у вырезанной детали. При работе по такой технологии для резки деталей специально готовят не большие листы, а предварительно вырезанные карты – заготовки нужного размера. Если нельзя вырезать деталь из заранее приготовленной карты – заготовки, то используют специально разработанную последовательность резки.

При таком способе первыми режутся стороны деталей, у которых наименьший припуск на механическую обработку, чтобы избежать искажения деталей. Но в производственных условиях не всегда можно это сделать. Из-за этого на практике всегда стараются получить минимальный отход при резке. Также очень гибкий остаток может быть причиной искажения размеров получаемых деталей, поэтому будет удобнее использовать технологию резки при которой часть отходов остаётся замкнутыми, и они не будут свободно деформироваться [4].

При больших масштабах производства даже малая экономия металла на одном изделии даст в итоге большую экономию. Есть несколько способов экономии металла:

- использование наиболее рационального расположения заготовок на листе;
- сокращать количество используемых перемычек;
- увеличивать точность расчётов как для заготовок, так и для припусков на обрезку;
- использовать получаемые отходы для изготовления других деталей;
- убирать брак и снизить нормы потерь времени на отладку установки резки.

Всё это можно достигнуть при использовании установки лазерной резки металла. Но ей необходимо тоже уметь грамотно пользоваться, тому же станок стоит в разы дороже установки плазменной резки.

И в независимости от того, что программа сама подберёт наиболее оптимальные варианты и способ раскроя, оператору всё же необходимо знать основные этапы, возможности их оптимизации и способы экономии для более качественной плазменной резки.

Основной операцией, связанной с вероятными потерями, является раскрой металла на штучные заготовки и полосы. Здесь требуется тщательная разработка раскройных карт. Для крупных заготовок применяют комбинированный раскрой. Узкие полосы режут вдоль листа, при этом уменьшая количество концевых отходов полосы. Но желательно резать широкие полосы, располагая детали соответственным образом.

При этом будет меньшее количество резов и меньшие потери на концевые расходы. Заготовки, которые будут подвергаться гибке, нарезаются с учётом направления волокон проката.

При разрезании штучных заготовок на гильотинных ножницах, зачастую не соблюдаются условия экономного расхода. Но это недопустимо! Поэтому нужно применять специальные устройства, облегчающие настройку и повышающие точность реза [5].

Всё затрудняется, если разрезается лист на разнотипные заготовки. В этом случае применяется метод комбинированного раскроя.

При раскрое листов на крупные полосы учитывают кратность длины полосы размерам вырезаемой детали. Это позволит использовать некротный остаток на резку полос для других деталей. В целях экономии металла листы раскладывают по разным картам раскроя. Их используют при групповом раскрое, когда из одного листа нужно получить различные детали, и при индивидуальном раскрое, когда необходимо получить несколько одинаковых деталей.

Более рациональное использование металла будет при размещении на одном листе заготовок различных габаритов, когда вначале размещают наиболее крупные заготовки, затем заготовки, потом заготовки средних размеров, и в конце, всё свободное место листа заполняют маленькими заготовками.

От того, как разложены детали на листе металла, зависит коэффициент использования материала.

При экономии листа раскраиваемого металла, также необходимо учитывать возможности технологического и организационного порядка, т.е. при разных способах размещения заготовок на листе, нужно выбирать тот, при котором будет удобнее реализовать имеющиеся на предприятии инструменты.

При таком способе не только минимизируются отходы, но и повышается производительность труда [6].

5. Скорость резки. Очень сильно на тепловые деформации влияет скорость резки. При возрастании скорости снижается количество теплоты, подводимое при резке к единице длины реза, что способствует уменьшению искажения деталей.

Скорость резки также зависит от интенсивности выплавления металла. При толщине подаваемого металла до 25 мм, быстрота операций плазменной резки выше, чем скорость других способов обработки металла (например, кислородно – газовой резки) почти в 2 раза. При уменьшении толщины материала преимущество плазменной резки возрастает ещё больше. Сквозной прожиг металла с помощью плазменной резки осуществляется за секунды, в то время как устройствам кислородно – газовой резки необходимо предварительно нагреть металл, что увеличивает время выполнения этой операции в десятки раз. Ещё следует учесть, что плазмотроны используются в основном на станках с ЧПУ. Это положительно сказывается как на скорости, так и на качестве резки [7].

Скорость перемещения резака определяет качество реза. От неё зависит присутствие шлака под листом и над ним, а также сложность его удаления. Если скорость мала, то возникает перерасход плазмообразующего газа. На нижней части листа появится легко удаляемый «низкорослый» шлак.

При большой скорости перемещения сопла линия реза становится волнистой. На нижней же части листа будет присутствовать плохо отделимый «высокорослый» шлак. Идеальной скоростью резки листового металла считается перемещение резака, при котором угол отставания между прорезанием верхней и нижней кромок металла не превышает 5 градусов [8].

6. Положение листа в процессе резки. Необходимо следить за тем, чтобы разделяемый лист не провисал под действием местного нагрева. Поэтому желательно наличие большого числа рёбер жёсткости на плазморезательной машине.

Внутренние напряжения, которые имеются в листе проката, искажают контуры реза. Они устраняются путём резки по внутреннему контуру.

Поверхность разрезаемого металла должна быть чистой и расположенной горизонтально. При соблюдении данных условий точность размеров вырезаемой детали и качество поверхности реза будут наилучшими. Именно потому стальные листы перед резкой подвергаются правке и очистке на дробеструйной установке.

Правка листов выполняется механическим способом: прокаткой на многовалковых листопрямительных вальцах, растяжением на растяжных правильных машинах. Проверку правленных листов производят измерением стрелы прогиба прямолинейной стальной рейкой; между рейкой и листом в местах прогиба должен быть виден просвет. Стрела прогиба не должна превышать 3 мм на 1 м длины, иначе искажение вырезаемых деталей будет значимым [9].

7. Равномерный нагрев может значительно уменьшить внутренние напряжения. При прямолинейной линии реза следует применять направление резки от середины к краям разрезаемого листа, детали сложной конфигурации вырезаются отдельными участками, при этом желательно, чтобы они были расположены друг напротив друга; вырезать детали обратно ступенчатым методом и т.д. [10].

Для достижения равномерного нагрева применяется одновременная резка несколькими резаками. Для избегания сильного искажения фигур простейшей формы (например, при вырезке полос), целесообразна одновременная резка двумя резаками, расположенными на необходимую ширину полосы или заготовки. В этом случае флюс подается отдельно от флюсопитателя.

Одно из свойств металла – изменение размера под воздействием температуры. При действии высокой температуры металл расширяется. Как он расширится зависит от температуры и коэффициента линейного расширения этого металла [11].

### Заключение

В статье авторами рассматривается множество вопросов, которые могут пригодиться не только людям, работающим на производстве, но и связанным только с теоретическими вопросами касательно плазменной резки.

Для лучшего понимания процесса плазменной резки и процессов, описываемых непосредственно в статье, авторы рекомендуют предварительно ознакомиться с соответствующей литературой.

В статье был выполнен вывод основной зависимости конечных деформаций, получаемых при плазменной резке, от таких параметров, как сила тока напряжение, длина и ширина реза и т.д. В полученной формуле все параметры являются известными перед резкой, либо после неё, при этом рассчитывать ничего не надо.

Относительно других вопросов, решаемых в статье можно сказать, что варианты, предложенные авторами, были найдены в изученной литературе.

Решения приводятся на усмотрение авторов, но могут быть и другие, не рассмотренные, либо неизвестные решения.

### Список литературы:

1. Michelle Avila «How metal fabricators can achieve plasma cut edge perfection» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/how-metal-fabricators-can-achieve-plasma-cut-edge-perfection>
2. Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства металлов. Материаловедение. Теория 24.12.2016 г. Вопросы по теории на тему «Влияние холодной пластической деформации и последующего отжига на структуру и свойства металлов» по предмету материаловедение в МГТУ им. Баумана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://otvetto.ru/notes/4329>
3. Деформации при резке. Резка листовых закаливающих сталей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2\\_24799\\_deformatsii-pri-rezke.html&lite=1](https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2_24799_deformatsii-pri-rezke.html&lite=1)
4. Методы экономии при плазменной резке. Экономим материал, снижаем себестоимость, увеличиваем прибыль. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka](http://www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka)
5. Плазменная резка и факторы, влияющие на её технологичность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-ee-tehnologichnost](http://pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-ee-tehnologichnost)
6. Tech-tips-for-better-plasma-cutting [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tech-tips-for-better-plasma-cutting>
7. Параметры плазменной резки. Теплолентмаш. Режим доступа <https://plasma-standok.ru/parametry-plazmennoy-rezki/>
8. §61. Техника резки. Metallurgiya. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml](http://metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml)
9. Erbilin M.I., Cakir O.I. Effects of process parameters in plasma arc cutting on stainless steels and structural steel. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://stumejournals.com/journals/mtm/2019/1/23/pdf>
10. Причины возникновения напряжений и деформаций. Онлайн справочник о сварке. osvarke.net. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/](http://osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/)
11. Distortion control of cutting piece in CNC plasma cutting machine [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://huawei-cutting.com/distortion-control-of-cutting-piece-in-cnc-plasma-cutting-machine-276.html>

## THERMAL DEFORMATION AND THE LOSS OF STABILITY DURING PLASMA CUTTING OF METAL

**Anna N. Vintsiv**

*JSC Ship yard «Vympel», (JSC SY «Vympel»), Rybinsk, Russia*

**Evgeny G. Burmistrov**

*Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article deals with the condition of metal sheets in plasma cutting process. The initial dependence of the deformation value on the length of the sheet metal  $L$ , the cutting width  $H$ , and the cutting speed is described. Furthermore, a new dependence of the strain value on the current, voltage, and material properties is derived from this formula. At the end of the article some ways of dealing with thermal deformations of a metal sheet that occur during plasma cutting are shown such as eliminating the stress state of metal sheets, the ratio of the linear dimensions of the part to its thickness. The technique of fixing metal sheets to the cutting table, reducing waste after cutting, the effect of cutting speed on thermal deformations, the position of the sheet during cutting and uniform heating of the sheet are described.*

*Keywords: permanent deformation, hardening of metal, tension of metal sheet, distortion, uniform heating, sheet thickness, cutting width.*

### References:

1. Michelle Avila «How metal fabricators can achieve plasma cut edge perfection» [Electronic resource]. – Access mode <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/how-metal-fabricators-can-achieve-plasma-cut-edge-perfection>
2. Vliyaniye holodnoy plasticheskoy deformatsii na strukturu i svoystva metallov. Materialovedenie. Teoriya 24.12.2016 g. Voprosy po teorii na temu «Vliyaniye holodnoy plasticheskoy deformatsii i posleduyushchego otzhiga na strukturu i svoystva metallov» po predmetu materialovedenie v MGTU im. Baumana. [Electronic resource]. – Access mode <https://otvetto.ru/notes/4329>
3. Deformatsii pri rezke. Rezka listovykh zakalivayushchihsya staley. [Electronic resource]. – Access mode [https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2\\_24799\\_deformatsii-pri-rezke.html&lite=1](https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2_24799_deformatsii-pri-rezke.html&lite=1)
4. Metody ekonomii pri plazmennoj rezke. Ekonomim material, snizhaem sebestoimost', uvelichivaem pribyl'. [Electronic resource]. – Access mode [www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka](http://www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka)
5. Plazmennaya rezka i factory, vliyayushchie na eyo tekhnologichnost'. [Electronic resource]. – Access mode [pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushchie na eyo tekhnologichnost'](http://pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-ee-tehnologichnost)
6. Tech-tips-for-better-plasma-cutting [Electronic resource]. – Access mode <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tech-tips-for-better-plasma-cutting>
7. Parametry plazmennoj rezki. Teploventmash. [Electronic resource]. – Access mode <https://plasma-standok.ru/parametry-plazmennoy-rezki/>
8. §61. Teknika rezki. Metallurgiya. [Electronic resource]. – Access mode [metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml](http://metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml)
9. Erbilin M.I., Cakir O.I. Effects of process parameters in plasma arc cutting on stainless steels and structural steel. [Electronic resource]. – Access mode <https://stumejournals.com/journals/mtm/2019/1/23/pdf>
10. Prichiny vozniknoveniya napryazhenij i deformatsij. Onlajn spravochnik o svarke. osvarke.net. [Electronic resource]. – Access mode [osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/](http://osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/)

11. Distortion control of cutting piece in CNC plasma cutting machine [Electronic resource]. – Access mode <https://huawei-cutting.com/distortion-control-of-cutting-piece-in-cnc-plasma-cutting-machine-276.html>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Винцив Анна Николаевна**, инженер – конструктор, Сектор плазово-технологической подготовки, АО «Судостроительный завод «Вымпел», (АО ССЗ «Вымпел»), Россия, г. Рыбинск, ул. Новая, 4  
[a.n.vintsiv@vypmel-rybinsk.ru](mailto:a.n.vintsiv@vypmel-rybinsk.ru)

**Anna N. Vintsiv**, engineer-constructor, Sector of plazo-technological training, JSC Ship yard «Vypmel», (JSC SY «Vypmel»), 4, Novaya str., Rybinsk, Russia,

**Бурмистров Евгений Геннадьевич**, профессор, д.т.н., кафедра ПиТПС, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: [burmistrov\\_e\\_g@mail.ru](mailto:burmistrov_e_g@mail.ru)

**Evgeny G. Burmistrov**, professor, d.t.s., faculty Ship Design and construction technologies, Federal state budgetary educational university of higher education «Volga state University of water transport», 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, Russia, 603951  
e-mail: [burmistrov\\_e\\_g@mail.ru](mailto:burmistrov_e_g@mail.ru)