

Экспериментальное исследование лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали с использованием волоконного и CO₂-лазеров при условии минимума шероховатости

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

Обобщены результаты экспериментального исследования лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO₂-лазеров. Исследована зависимость шероховатости поверхности реза от параметров резки и сформулированы условия, при которых шероховатость минимальна. Показано, что для обоих типов лазеров эти условия выражаются одинаковым образом через безразмерные переменные – число Пекле Pe и мощность Q лазерного излучения на единицу толщины разрезаемого листа – и имеют вид законов подобия: $Pe = const$, $Q = const$. Найдены оптимальные значения Pe и Q . Выведены эмпирические соотношения, связывающие мощность лазерного излучения и скорость резки с толщиной разрезаемого листа при условии минимума шероховатости в случае резки излучениями волоконного и CO₂-лазеров.

Ключевые слова: лазерная резка, CO₂-лазер, волоконный лазер, качество реза, оптимизация, безразмерные критерии.

1. Введение

Преимуществами лазерной резки материалов являются высокая скорость процесса и высокое качество обработки. В последнее десятилетие активно исследовалась и стала применяться на практике резка с использованием мощных твердотельных волоконных или дисковых лазеров. В результате многочисленных исследований установлено, что имеется ряд различий в резке металлов с помощью волоконного и CO₂-лазеров. Волоконный лазер имеет преимущество перед CO₂-лазером при резке тонких (толщиной не более 4 мм) листов стали [1]: он обеспечивает значительно большую скорость резки, чем CO₂-лазер, при сравнимом качестве реза. В случае толстых листов скорости резки при использовании обоих лазеров сопоставимы, но CO₂-лазер обеспечивает более высокое качество реза.

Причины различий характеристик резов, выполненных с помощью двух типов лазеров, пока ясно не сформулированы. По мнению большинства исследователей, они имеют фундаментальный характер и связаны с особенностями распространения и поглощения лазерного пучка излучения с длинами волн 1.07 и 10.6 мкм в канале реза [2–4].

Продвинуться в понимании физических особенностей лазерной резки излучением с различными длинами волн позволяют сравнительные экспериментальные исследования. Они проводились, например, в [5, 6], где изучался энергетический баланс резки в атмосфере инертного газа.

Лазерная резка может осуществляться в некотором диапазоне её скоростей и при разных значениях мощности излучения. Поскольку преимуществом лазерной резки является высокое качество реза, а важнейшим его кри-

терием во многих применениях служит шероховатость поверхности реза, представляет интерес определение условий резки, обеспечивающих минимальную шероховатость. Теоретическое решение задачи оптимизации лазерной резки по критерию качества реза в настоящее время осложнено тем, что не разработана модель формирования рельефа поверхности реза с учётом всех возможных механизмов. Максимальная скорость резки, которая может быть получена исходя из баланса энергии, не является, вообще говоря, оптимальной с точки зрения качества реза.

В экспериментальных исследованиях, как правило, определяется максимальная скорость резки для каждого лазера, затем фиксируется соответствующая ей величина шероховатости. При этом не всегда ясно формулируются критерии, по которым выбирались исходные параметры резки. В настоящей работе применён другой подход. Сначала проводится оптимизация параметров резки и определяется минимально достижимая для каждого лазера величина шероховатости. Затем фиксируется скорость, соответствующая минимуму шероховатости.

Другая особенность данной работы состоит в использовании безразмерных параметров для сравнения характеристик резки с помощью волоконного и CO₂-лазеров. Это позволяет представить экспериментальные результаты в обобщённом и компактном виде.

В наших предыдущих работах [7, 8] задача оптимизации для CO₂-лазера была решена экспериментально. Для лазерно-кислородной резки стальных листов условия качественной резки были сформулированы в виде законов подобия – найдены значения обобщённых безразмерных переменных, при которых шероховатость поверхности минимальна. В качестве таких переменных использовались безразмерная лазерная мощность и число Пекле.

В настоящей работе продолжено углублённое исследование задачи оптимизации лазерной резки и впервые проведено детальное сравнение параметров резки с помощью волоконного и CO₂-лазеров в условиях получения минимальной шероховатости, результаты сформулированы с использованием безразмерных параметров.

А.А.Гольшев, А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: shulyat@rambler.ru

2. Методика экспериментов

Для резки применялся иттербиевый лазер IPG/IRE-Polus с коллиматором (IPG, модель D5-WC/AC) с мощностью 2 кВт и параметром качества пучка BPP (произведение радиуса пучка в ближней зоне и углового радиуса пучка в дальней зоне), равным 3.8 мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе после коллиматора составлял 17 мм при фокусном расстоянии линзы 200 мм, резка выполнялась при мощности излучения 0.5–2 кВт. Применялся также непрерывный CO₂-лазер с параметром BPP, равным 4.7 мм·мрад [9]. Резка проводилась излучением мощностью 0.5–3.5 кВт с круговой поляризацией по традиционной схеме. Излучение фокусировалось линзой из ZnSe с фокусным расстоянием 190 мм. Диаметр пучка на линзе составлял 25 мм. Волоконным лазером разрезались листы низкоуглеродистой стали СтЗпс толщиной 3, 5 и 10 мм, CO₂-лазером – листы толщиной 5, 10 и 16 мм. Струя кислорода формировалась коническим соплом при избыточном давлении газа в камере лазерного резака 0.25 МПа в случае резки листов толщиной 3 мм и 0.05 МПа в случае резки листов толщиной 5, 10 и 16 мм.

В качестве меры шероховатости (характерной высоты неоднородности) использовалась величина R_z . Шероховатость измерялась с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT и профилметра Rank Taylor Hobson (серия Form Talysurf). Микроскоп позволял методом послыоного сканирования получить трехмерную картину поверхности и определить величину шероховатости в заданном сечении. В нашем случае R_z определялось в двух сечениях – на расстояниях 1/3 и 2/3 толщины от верхней поверхности листа. Для характеристики данного образца выбиралась ббльшая из двух величин.

Оптимальные параметры находились в два этапа. Вначале проводилась оптимизация по двум параметрам: для данного значения мощности определялись оптимальные положение перетяжки пучка и скорость резки, которая далее обозначена как V_c^* . От положения фокуса пучка зависела ширина реза, оптимальное значение которой b^* определялось для каждой мощности. Затем, на втором этапе, проводилась оптимизация уже по мощности излучения. Из нескольких пар значений V_c^* и b^* , отвечающих разным мощностям, выбирались те, при которых шероховатость поверхности реза была минимальна. Эти величины обозначены как V_{opt} и b_{opt} , а соответствующая им лазерная мощность считалась оптимальной.

Связь между шероховатостью R_z поверхности реза и параметрами резки можно представить в виде функциональной зависимости

$$R_z = F(W, V_c, h, b, \Delta p, \rho_g, \mu_g, u_g, c_m, \lambda_m, \rho_m, T_m, L_m, f), \quad (1)$$

где W – мощность излучения; V_c – скорость резки; h – толщина разрезаемого листа; b – ширина реза; Δp – перепад давлений технологического газа на толщине листа; ρ_g , u_g и μ_g – плотность, средняя скорость и динамическая вязкость технологического газа; c_m , λ_m , ρ_m , T_m и L_m – удельная теплоемкость, теплопроводность, плотность, температура плавления и удельная теплота плавления разрезаемого материала; f – фокусное расстояние линзы.

Ранее в работах [7, 8] экспериментально было показано, что для описания шероховатости поверхности R_z при резке низкоуглеродистой стали излучением CO₂-лазера с

кислородом в качестве технологического газа вместо (1) можно использовать функцию

$$\frac{R_z}{h} = \Phi(Re, Q, A_i) \quad (2)$$

со следующими безразмерными параметрами: $Re = V_c b \rho_m c_m / \lambda_m = V_c b \gamma$ – число Пекле; $\gamma = \lambda_m / (\rho_m c_m)$ – температуропроводность материала; $Q = W / (\lambda_m h T_m)$ – мощность лазерного излучения. Символом A_i обозначен набор параметров, характеризующих систему фокусировки излучения, качество лазерного пучка, свойства и химический состав разрезаемого материала; эти параметры в нашем исследовании сохранялись постоянными.

Необходимо отметить, что сама возможность существования функции (2), описывающей через указанные безразмерные параметры всё многообразие экспериментальных данных для двух разных лазеров с длинами волн излучения, различающимися в 10 раз, требует экспериментальной проверки. Второй фундаментальной задачей, имеющей практически важное значение, являлось экспериментальное определение вида этой функции и выяснение того, имеет ли она минимум, как в случае CO₂-лазера. Приведённым безразмерным параметрам соответствуют размерные комбинации W/h , $V_c b$, которые могут быть определены экспериментально.

Для проведения оптимизации, т.е. поиска минимума R_z , варьировались толщина h разрезаемого листа, мощность W лазерного излучения, скорость V_c резки и ширина b реза.

3. Результаты экспериментов

Максимальный объём данных при резке с помощью как CO₂-, так и волоконного лазера получен для толщины материала 5 мм. На рис.1 представлены фотографии поверхности реза, сделанного при мощности излучения 1 кВт и оптимальной скорости резки, отвечающей минимуму шероховатости, 0.8 м/мин для волоконного лазера и 1.5 м/мин для CO₂-лазера. Видно сходство структур поверхности при использовании обоих типов лазеров. В верхней части поверхности реза наблюдаются регулярные штрихи, а в ниж-

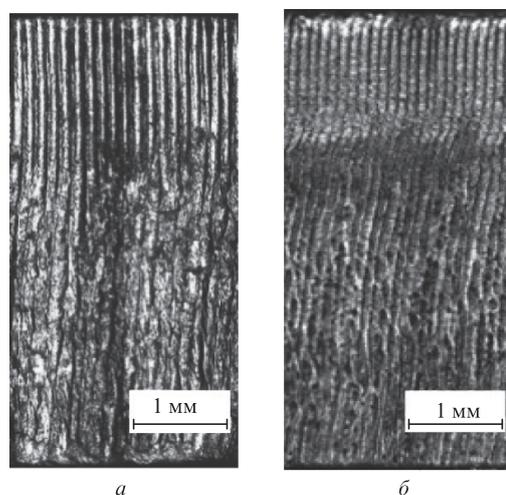


Рис.1. Фотографии поверхности реза листа низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм при резке с использованием волоконного лазера ($W = 1$ кВт, $V_c = 0.8$ м/мин) (а) и CO₂-лазера ($W = 1$ кВт, $V_c = 1.5$ м/мин) (б).

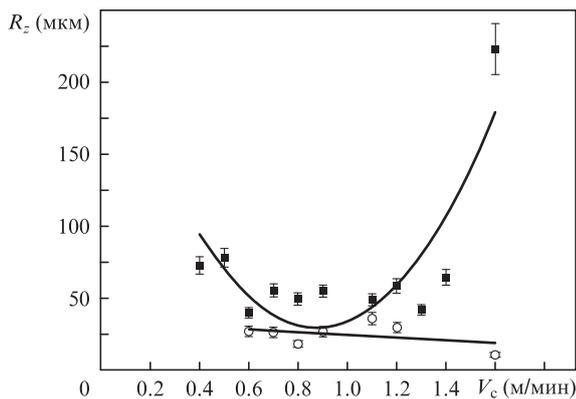


Рис.2. Зависимости шероховатости от скорости резки с использованием волоконного лазера при мощности 1 кВт и толщине листа 5 мм вблизи верхней (○) и нижней (■) поверхностей образца.

ней – более хаотичные. Соотношения глубин зон, шаги рисок и их углы наклона в обоих случаях близки.

Результаты измерения шероховатости в зависимости от скорости резки излучением волоконного лазера приведены на рис.2. Видно, что в верхней части поверхности реза шероховатость практически не зависит от скорости и слабо уменьшается с её ростом. В нижней части поверхности, где наблюдаются более крупные структуры, шероховатость зависит от скорости резки и при $V_c = 0.8-0.9$ м/мин имеет минимум.

В экспериментах на первом этапе для каждой лазерной мощности находились оптимальные скорость и ширина реза – V_c^* и b^* . Результаты такой оптимизации для толщины 5 мм при резке с использованием волоконного и CO₂-лазеров представлены на рис.3 и 4.

На рис.4 приведены значения максимальной скорости резки V_{max} , при превышении которой наблюдается непрорез. Отметим, что при резке с кислородом в качестве технологического газа максимальная скорость всегда больше оптимальной и в пределах экспериментального разброса значений не зависит от типа лазера.

Зависимости оптимальных ширины реза (рис.3) и скорости (рис.4) от мощности для CO₂- и волоконного лазеров принципиально различны. Величины V_c^* и b^* при использовании CO₂-лазера линейно растут с ростом мощности, тогда как в случае волоконного лазера они остаются практически постоянными ($V_c^* = 0.7-0.9$ м/мин и $b^* = 480-514$ мкм в интервале мощностей 0.5–2 кВт).

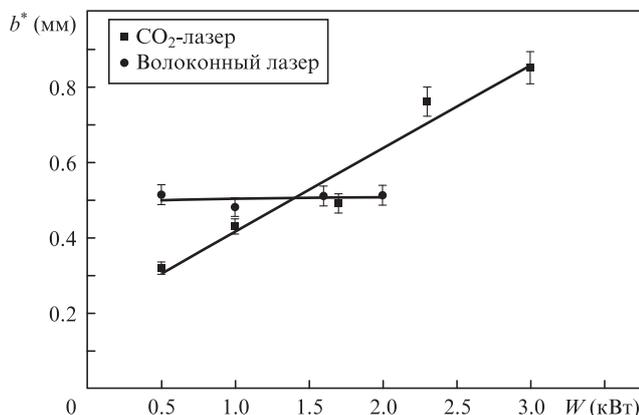


Рис.3. Оптимальная ширина реза в зависимости от мощности излучения для волоконного и CO₂-лазеров при $V_c = V_c^*$.

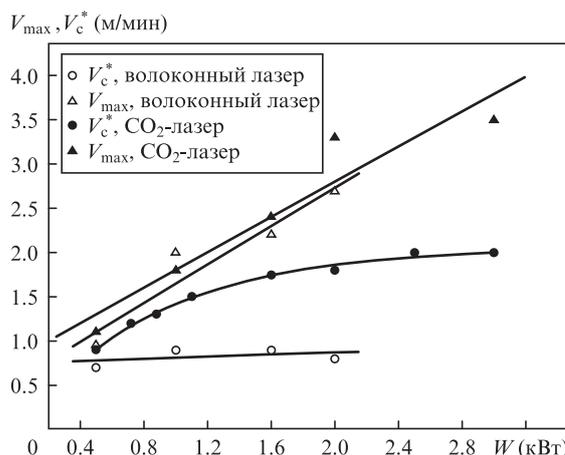


Рис.4. Максимальные скорости резки V_{max} и скорости V_c^* , соответствующие минимуму шероховатости, в зависимости от мощности излучения для волоконного и CO₂-лазеров при $h = 5$ мм.

Обобщённые данные для разных толщин образцов при оптимизации резки по двум параметрам – скорости и ширине реза – представлены на рис.5 в виде зависимости числа Пекле $Pe^* = V_c^* b^* / \gamma$, рассчитанного по оптимальной скорости и оптимальной ширине реза, от безразмерной лазерной мощности $Q = W / (\lambda_m h T_m)$. Использовались тепловые характеристики для чистого железа.

Из рис.5 видно, что в безразмерных координатах данные для разных толщин описываются линейной зависимостью $Pe^*(Q)$, вид которой определяется типом лазера. В случае волоконного лазера эта зависимость является «вырожденной» – разным значениям лазерной мощности соответствует одинаковое в пределах погрешности эксперимента оптимальное число Пекле. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне параметров при резке с использованием волоконного лазера для достижения минимальной шероховатости, оптимизированной по скорости и ширине реза (положению фокуса), необходимо обеспечить число Пекле $Pe^* = 0.35$ независимо от толщины разрезаемого листа и мощности лазера.

В случае CO₂-лазера разным значениям безразмерной мощности соответствуют разные оптимальные числа Пекле, при этом зависимость $Pe^*(Q)$ близка к линейной.

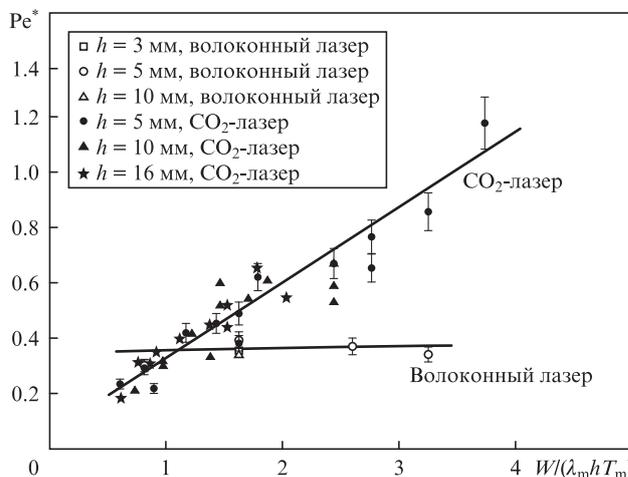


Рис.5. Число Пекле, соответствующее минимуму шероховатости, в зависимости от безразмерной мощности излучения для образцов металла разной толщины h .

Измерения показали, что соответствующая оптимальной скорости и ширине реза шероховатость зависит от мощности – она изменяется вдоль линий на рис.5, представляющих собой зависимости $Re^*(Q)$. Обобщённые данные, полученные при оптимизации резки по трём параметрам – скорости резки, положению фокуса относительно поверхности (ширине реза) и мощности излучения лазера, приведены на рис.6 в виде зависимостей шероховатости поверхности R_z/h от числа Пекле и безразмерной мощности.

Фактически на рис.6 представлен экспериментально определённый функционал $R_z/h = \Phi(Q, Re^*)$ для обоих типов лазера. Видно, что данная функция имеет чашеобразную форму с минимумом, который соответствует оптимальным условиям резки: $Re_{opt} = const, Q_{opt} = const$. Оптимальные значения безразмерных параметров приведены в табл.1.

Сечения чаш $R_z/h = const$ на рис.6 имеют эллипсоидную форму, их большие оси совпадают с линиями на рис.5, являющимися результатом оптимизации по двум параметрам. Для волоконного лазера чаша вытянута вдоль оси безразмерной мощности, что соответствует условию $Pe = const$, а для CO₂-лазера она наклонена к этой оси под некоторым углом.

Из приведенных данных видно, что закон подобия вида (2) является общим для обоих типов лазера, но его детали, в частности форма зависимости $R_z/h = \Phi(Q, Pe)$ и

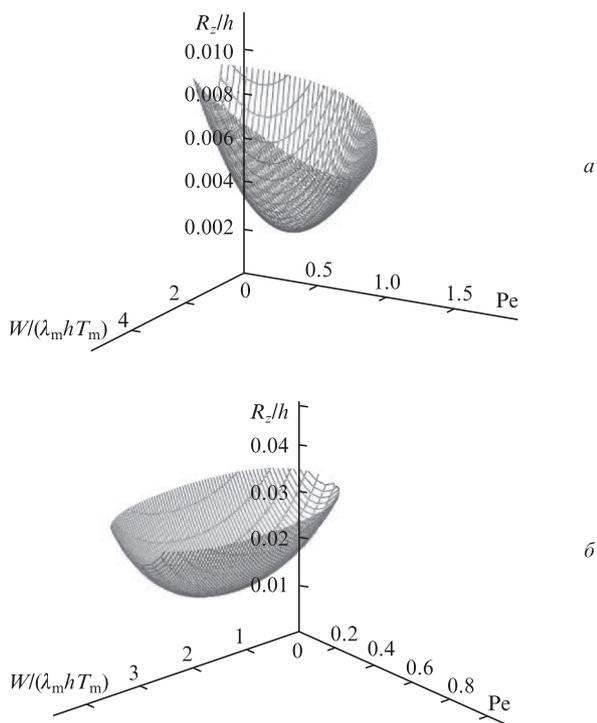


Рис.6. Экспериментальные зависимости шероховатости поверхности R_z/h от числа Пекле $Pe = V_c b / \gamma$ и безразмерной мощности $Q = W / (\lambda_m h T_m)$ при резке листов толщиной 5 мм с использованием CO₂-лазера (а) и волоконного лазера (б).

Табл.1. Оптимальные безразмерные параметры резки.

Параметр	CO ₂ -лазер ($\lambda = 10.6$ мкм)	Волоконный лазер ($\lambda = 1.07$ мкм)
$Pe_{opt} = V_{opt} b_{opt} / \gamma$	0.5	0.35
$Q_{opt} = W / (\lambda_m h T_m)$	1.6	1.6–2.6

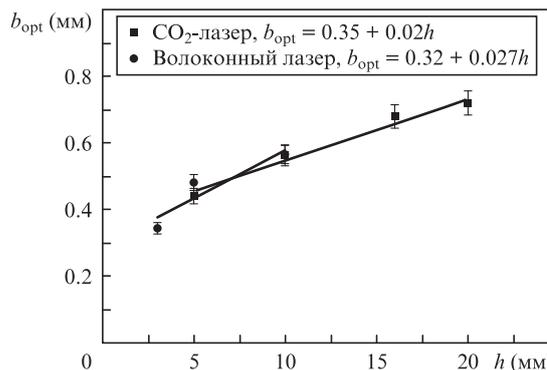


Рис.7. Оптимальная ширина реза при оптимальном положении фокуса и оптимальных мощности излучения и скорости резки в зависимости от толщины листа для волоконного и CO₂-лазеров.

оптимальные числа Пекле, различаются. В случае CO₂-лазера зависимость $R_z/h(Q)$ имеет выраженный минимум. При резке с использованием волоконного лазера существует достаточно большой диапазон значений Q с очень слабой зависимостью шероховатости от мощности.

Данные табл.1 позволяют в простой и наглядной форме представить и сравнить условия получения минимальной шероховатости поверхности реза при использовании двух типов лазера. Для практических целей более удобны размерные зависимости. Для достижения минимальной шероховатости мощность лазера необходимо увеличивать пропорционально толщине разрезаемого листа, так, чтобы выполнялось условие $W/h = 200 \pm 20$ Вт/мм в случае CO₂-лазера. При резке с использованием волоконного лазера в диапазоне $W/h = 200 - 320$ Вт/мм не происходит значимого изменения шероховатости, и при данной толщине листа увеличение мощности не приводит к росту оптимальной скорости (см. рис.4). Поэтому целесообразно использовать одинаковую для обоих лазера мощность – 200 Вт на 1 мм толщины разрезаемого листа.

Ширина реза не относится к задаваемым параметрам лазерной резки, она является характеристикой реза, что затрудняет использование условия $V_{opt} b_{opt} = const$. Оптимальная ширина реза как для волоконного, так и для CO₂-лазера растёт с увеличением толщины разрезаемого листа. При этом на зависимость ширины реза от толщины практически не влияет тип лазера (рис.7). Данные на рис.7 аппроксимируются зависимостями $b_{opt} = 0.35 + 0.02h$ для CO₂-лазера и $b_{opt} = 0.32 + 0.027h$ для волоконного лазера. Это позволяет исключить ширину реза из условия $V_{opt} b_{opt} = const$ и в пределах экспериментального разброса $\pm 15\%$ выразить оптимальную скорость резки через толщину листа аналитической зависимостью. Соотношения для оптимальной скорости резки имеют следующий вид: $V_{opt} = 11 / (0.35 + 0.02h)$ для CO₂-лазера и $V_{opt} = 7 / (0.32 + 0.027h)$ для волоконного лазера, где b_{opt} и h взяты в мм, а V_{opt} – в мм/с.

4. Заключение

Проведено сравнительное исследование лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали с помощью волоконного лазера (длина волны 1.07 мкм) и CO₂-лазера (длина волны 10.6 мкм). В результате обобщения экспериментальных данных определены условия, при которых шероховатость поверхности реза минимальна. Эти условия выражены в виде законов подобия через безразмер-

ные переменные – число Пекле $V_c b/\gamma$ и лазерную мощность на единицу толщины листа $W/(\lambda_m h T_m)$. Условия имеют одинаковый для двух типов лазеров вид: $V_{opt} b_{opt}/\gamma = \text{const}$, $W_{opt}/(\lambda_m h T_m) = \text{const}$. Найдены значения безразмерных переменных, соответствующие минимуму шероховатости при резке с использованием волоконного и CO₂-лазеров.

Из законов подобия получены простые соотношения, которые позволяют при заданной толщине листа определить основные исходные параметры лазерной резки – мощность лазера и скорость резки, отвечающие минимуму шероховатости.

1. Powell J., Kaplan A.F.H. *Proc. 31th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2012* (Anaheim, CA, USA, 2012, p.277).
2. Petring D., Schneider F., Wolf N., Nazery V. *Proc. 27th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2008* (Temecula, CA, USA, 2008, p.95).
3. Mahrle A., Beyer E. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 175507 (2009).
4. Hirano K., Fabbro R. *J. Laser Appl.*, **24**, 012006 (2012).
5. Scintilla L.D., Tricarico L., Mahrle A., Wetzig A., Himmer T., Beyer E. *Proc. 29th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2010* (Anaheim, CA, USA, 2010, p.249).
6. Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **69**, 30 (2013).
7. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 1152 (2009).
8. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **39**, 547 (2009).
9. Афонин Ю.В., Голышев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).