

# Wpływ płomienia acetylenu, propanu i metanu do podgrzewania wstępnego na właściwości stali drobnoziarnistej

Effect of acetylene, propane and methane flame for preheating on the fine-grained steel properties

## Streszczenie

Wykonano próby podgrzewania kilku gatunków stali do różnych wartości temperatury, mające na celu określenie skuteczności i wydajności ww. paliw gazowych oraz rozpoznanie ich potencjalnie szkodliwych skutków dla właściwości materiału. Badano możliwość wykorzystania poszczególnych gazów do ogrzewania, suszenia i podgrzewania wstępnego. Omówiono wpływ gazów na tworzenie się wody kondensacyjnej na powierzchni podgrzewanych elementów i w konsekwencji na ich korozję. Najlepszym gazem okazał się acetylen. Badania właściwości mechanicznych oraz próba twardości wykazały, że podgrzewanie nie powoduje szkodliwych skutków dla obrabianych materiałów, a zwłaszcza kruchości wodorowej. Stwierdzono, że podgrzewanie wstępne jest procesem niezbędnym w przetwórstwie stali konstrukcyjnych o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości.

## Abstract

The paper presents results of tests of several kinds of steels heating to various temperatures, to determine the effectiveness and efficiency of acetylene, propane and methane flame as gaseous fuels and to identify their potentially harmful effects on the properties of the material. Investigated the possibility of using different gases for heating, drying and preheating. The influence of various gases on the formation of condensation water on the surface of heated elements, and consequently on their corrosion. The most preferred gas was acetylene. The study of the mechanical properties and hardness test showed that the heating does not cause the expected adverse effects on treated materials, particularly hydrogen embrittlement. It was found that pre-heating is necessary in the manufacturing process strengthen structural steels and high strength steels.

## Wstęp

Wykorzystanie w przemyśle materiałów o wysokiej i podwyższonej wytrzymałości jest obecnie kluczowym elementem wytwarzania podzespołów podlegających wysokim naprężeniom w takich dziedzinach jak budownictwo okrętowe i konstrukcje stalowe, w tym konstrukcje przybrzeżno-morskie. Materiały te umożliwiają wytwarzanie elementów o mniejszym przekroju, a przenoszącym te same obciążenia, co oznacza, że mogą mieć mniejszą masę. Zwiększone wykorzystanie drobnoziarnistych stali konstrukcyjnych sprawia, że podgrzewanie wstępne odgrywa coraz większą rolę.

Podgrzewanie można wykonywać różnymi sposobami i przy użyciu różnych urządzeń. Zwyczajowo podgrzewa się je przy użyciu mat grzewczych, w piecu lub płomieniowo. Dwie pierwsze metody stosowane są do podgrzewania elementów niepoddawanych dalszemu przetwarzaniu. Natomiast płomień wykorzystuje się do podgrzewania międzyoperacyjnego lub jako przygotowanie do mającego nastąpić procesu łączenia lub cięcia. Najczęściej stosowanymi gazami palnymi są: acetylen, propan (LPG) oraz metan (gaz ziemny). Dostępne, towarzyszące gazy utleniające, to czysty tlen oraz powietrze zasysane z atmosfery i powietrze sprężone.

W artykule przedstawiono próby przeprowadzone na różnych materiałach i w różnej temperaturze podgrzewania. Próby te miały na celu podkreślenie skuteczności zastosowane gazów palnych i rozpoznanie wszelkich, potencjalnie szkodliwych skutków dla właściwości materiału. Następstwem zebrania

Sven Selling, Ronald Steusloff – Linde Gas.

danych miała być optymalizacja wykorzystania paliwa gazowego do określonych zastosowań i zminimalizowanie ryzyka powstania kłopotów materiałowych na dalszych etapach procesu wytwarzania.

## Podgrzewanie płomieniowe

W procesie przetwarzania metali podgrzewanie płomieniowe stosuje się do różnych celów. Zabieg ten stosuje się od operacji, gdzie temperatura wynosi ok. 100°C, do kształtowania stali na gorąco w temperaturze ok. 1000°C. W dalszej części artykułu omówiono bardziej szczegółowo obszary wykorzystania płomienia gazowego do podgrzewania osuszającego, podgrzewania wstępnego, czy też obróbki cieplnej. Jest to szczególnie ważne, ponieważ drobnoziarnista stal konstrukcyjna jest obecnie wykorzystywana w coraz większym stopniu, co wymaga odpowiedniej, zarówno wstępnej, jak i późniejszej obróbki cieplnej, jak np. podczas spawania.

### Podgrzewanie osuszające

Podgrzewanie osuszające jest istotnym procesem w przebiegu dalszej obróbki, takich jak cięcie płomieniowe lub spawanie. Zakres temperatury roboczej wynosi 80÷120°C dla blach grubszych niż 30 mm. Usuwanie wilgoci z powierzchni obrabianego elementu lub złącza spawanego zapobiega powstawaniu wad w późniejszym okresie, takich jak porowatość i pęknięcia, oraz związanej z nimi kosztownej naprawy tych wad po przeprowadzeniu zasadniczego procesu. Uzyskuje się to dzięki wykorzystaniu płomienia acetyleno-ze sprężonym powietrzem lub acetyleno-z tlenem. Użycie propanu lub metanu daje zazwyczaj przeciwny skutek ze względu na obecność wysokiego stężenia pary wodnej w produktach spalania tych gazów, co powoduje, że do złącza wchodzi dodatkowa wilgoć, pogarszając w ten sposób wyniki spawania.

### Podgrzewanie wstępne

Znaczenie podgrzewania stale wzrasta ze względu na zwiększone zużycie drobnoziarnistej stali konstrukcyjnej. Dlatego ważne jest podgrzanie elementu do wcześniej określonej temperatury w celu spowolnienia procesu chłodzenia, co minimalizuje ryzyko wzrostu twardości i powstania pęknięć. Proces ten jest wyszczególniony i zalecany w licznych arkuszach danych materiałowych dotyczących żelaza i stali. Obszar i temperatura, do której element musi być podgrzany, zależą od różnych czynników, m.in. od grubości obrabianego elementu, rodzaju materiału i metody spawania. Jeśli wartość CET jest wyższa niż 0,40%, podgrzewanie jest na ogół wymagane dla wszystkich grubości blachy. Norma DIN-EN 1011-2 przedstawia ogólne zasady

wyznaczania temperatury podgrzewania wstępnego przy wykorzystaniu równoważnika węgla. Obydwie te kluczowe wartości mają przyczynić się do zapewnienia dostatecznie wysokiej temperatury w obrabianym elemencie, aby zapobiec powstawaniu pęknięć wodnorodowych w drobnoziarnistej stali konstrukcyjnej. Temperatura jest rejestrowana po przeciwnej stronie źródła ciepła.

## Badane materiały

Badano pięć stali: S460G2+M, S690QL1, P460NL1, S690QL i S960QL.

Stale te stosowane są do budowy zbiorników ciśnieniowych, morskich platform wiertniczych oraz dźwigów. Zostały one podzielone na trzy klasy wytrzymałościowe: 460 N/mm<sup>2</sup>, 690 N/mm<sup>2</sup> i 960 N/mm<sup>2</sup>. Kody na końcu symbolu wskazują stan w momencie dostawy i udarność materiału. Litery QL oznaczają, że stal została dostarczona w stanie odpuszczonym i musi osiągnąć udarność 27 J w temperaturze -40°C. Podobnie QL1 wskazuje, że stal została dostarczona w stanie odpuszczonym, jednak udarność 27 J została osiągnięta w temperaturze -60°C. Udarność 27 J musi być uzyskana dla próbek, które zostały pobrane poprzecznie do kierunku walcowania. Pozostałe litery NL1 oznaczają, że materiał jest dostępny w stanie normalizowanym po walcowaniu i uzyskuje udarność 27 J w temperaturze -40°C. G2+M oznacza, że materiał był obrabiany termomechanicznie (litera M) i uzyskuje udarność przynajmniej 60 J w temperaturze -40°C (G2). Te wartości udarności odnoszą się również do próbek pobranych poprzecznie do kierunku walcowania. Wszystkie blachy zostały dostarczone po walcowaniu. Na początku zbadano ich skład chemiczny i najważniejsze właściwości mechaniczne.

## Nagrzewanie próbek

Na podstawie wcześniej przeprowadzonych prób dokonano ogólnych ustaleń odnośnie prowadzenia procesu wstępnego podgrzewania próbek. Dotyczy to prędkości roboczej przesuwu palnika, która jest utrzymywana na stałym poziomie 0,5 m/s. Temperaturę podgrzewania wstępnego ustalono na 150°C i 300°C. Ponadto wykorzystano skomputeryzowany układ sterowania numerycznego maszyny w celu zapewnienia jednakowych warunków podgrzewania wszystkich próbek, jak również stałego ruchu oscylacyjnego palnika (rys. 1).

Próbki podgrzewano kolejno acetylenem, a następnie propanem i metanem. Podczas prób utrzymywano stałą odległość palnika od materiału, która wynosiła ok. 2÷3 mm.

Zaobserwowano, że płomienie wytwarzane przez propan i metan są mniej intensywne i znacznie mniejsze niż płomień acetylenowy. Te aspekty dają



**Rys. 1.** Stanowisko badawcze  
**Fig. 1.** Testing station

podstawy do twierdzenia, że będą różne czasy nagrzewania dla poszczególnych elementów. Również obserwuje się znaczne różnice pomiędzy rodzajami gazów palnych w kwestii osiąganych wartości temperatury, odczytywanej w punkcie pomiarowym. Wzrost temperatury jest znacznie niższy, gdy ogrzewa się propanem i metanem aniżeli acetylenem. Na przykład ogrzewanie stali P460NL1 do 150°C propanem jest dłuższe o ok. 30% niż acetylenem. Zastosowanie metanu powoduje dalsze wydłużenie czasu podgrzewania do ok. 40%. Ogrzewanie tej samej stali do 300°C powoduje, że różnica czasu dla uzyskania żądanej temperatury wzrasta jeszcze bardziej i wówczas różnica czasu między propanem i acetylenem wynosi ok. 60%, a przy porównaniu metanu z acetylenem ok. 76%. Widoczne jest, że przenikanie ciepła do ogrzewanego elementu, gdy używa się propanu i metanu, powoduje powolne asymptotyczne zbliżanie się do zadanej temperatury, natomiast dużo wyższą temperaturę można osiągnąć przy użyciu acetyleny.

Gdy ogrzewano powierzchnię oczyszczoną strumieniem śrutu, zaobserwowano inne interesujące zjawisko. Możliwe było uchwycenie różnicy w oddziaływaniu płomienia różnych gazów na powierzchnię podgrzewanego elementu w temperaturze pokojowej i podczas dalszego procesu ogrzewania. W przypadku acetyleny, po zapaleniu palnika i jego przejściu przez ogrzewany element, można zauważyć na początku słabo widoczną mgłę wodną. W czasie przebiegu procesu podgrzewania na ogrzewanym elemencie widoczny jest jedynie ślad płomienia. Po przekroczeniu temperatury 200°C powoli pojawiają się barwy nalotowe, które stają się coraz intensywniejsze aż do osiągnięcia wymaganych 300°C. Barwy te pozostają nadal widoczne po ostygnięciu metalu. Są one równomiernie rozłożone od środka na zewnątrz ku brzegom.

Ogrzewanie przy użyciu metanu i propanu przebiega nieco inaczej. Oprócz tego, że proces nagrzewania

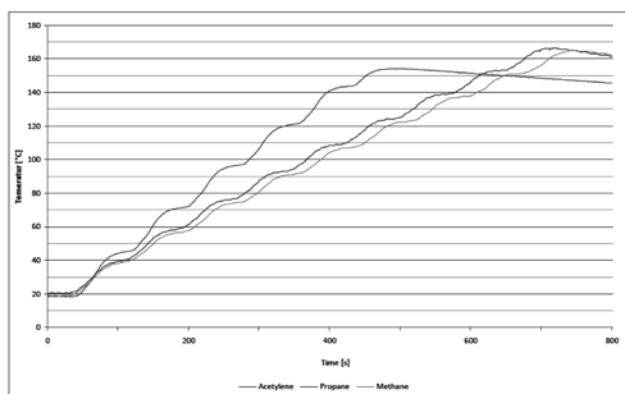
trwa dłużej, prowadzi on także do korozji powierzchni w trakcie i bezpośrednio po podgrzewaniu. Przy obydwóch gazach następuje natychmiastowe gromadzenie się wody na powierzchni elementu po zapaleniu palnika. Gromadzenie się wody jest znacznie większe w przypadku użycia metanu niż propanu, co prowadzi do wysokiego stopnia korozji powierzchni. Podczas procesu ogrzewania, oprócz tego, że wzrasta temperatura, następuje również osuszanie powierzchni. Woda odparowuje całkowicie gdy temperatura mierzona po przeciwnej stronie niż ta, na którą oddziałuje płomień, osiągnie wartość ok. 75°C, co oznacza, że temperatura po stronie palnika wynosi przynajmniej 100°C. Po odparowaniu i osiągnięciu temperatury 150°C można zaobserwować widoczny początek korozji powierzchniowej. Gdy ogrzewa się dalej do temperatury 300°C, pojawiają się barwy nalotowe, które nie tworzą linii jak w przypadku acetyleny, natomiast są rozłożone równomiernie po całej powierzchni.

Analiza krzywych nagrzewania stali S690QL1 dla wszystkich trzech rodzajów gazu wskazuje, że jeśli po przekroczeniu temperatury 150°C usunie się płomień, wówczas krzywa natychmiast opada (rys. 2).

Zarówno dla metanu, jak i propanu z powodu małej mocy płomienia i jego niskiej temperatury rejestruje się powolny wzrost temperatury. Ponadto szybkość przenikania ciepła do podgrzewanego elementu jest mniejsza od szybkości odprowadzania ciepła. Dla porównania, użycie acetyleny prowadzi do szybszego wzrostu temperatury. Usunięcie płomienia pokazuje, że w zasadzie następuje ustabilizowanie się temperatury. Dzieje się tak z powodu mocy płomienia, która jest trzy- lub czterokrotnie większa, co prowadzi do lepszego rozkładu ciepła w ogrzewanym elemencie. Jednakże, właściwość ta słabnie ze wzrostem grubości blachy.

Ponadto, gdy podgrzewa się acetylenem stal S460G2+M, wymaganą temperaturę osiąga się szybciej niż w przypadku trzech pozostałych stali: P460NL1, S690QL, S960QL.

Jeśli rozpatrzemy teraz strukturę płomienia poszczególnych gazów, możemy zauważyć, że jądro płomienia acetyleny jest dużo większe niż propanu i metanu. W przeciwieństwie, w przypadku metanu i propanu dużo większa jest kłta płomienia. Wynikiem tej różnicy



**Rys. 2.** Krzywe nagrzewania stali S690QL1  
**Fig. 2.** S690QL1 steel heating curves

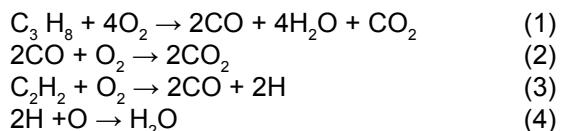
jest to, że gdy podgrzewa się acetylenem, ciepło jest wprowadzane do elementu szybciej niż gdy używa się innych gazów. Podczas prób ustalono, że powierzchnia elementu próbnego nie jest przegrzewana w żadnym punkcie, gdyż prowadziłoby to do zmiany struktury. Ponadto, podczas wszystkich tych prób należało unikać uszkodzenia powierzchni. W związku z tym wyrywkowo mierzono temperaturę na powierzchni przy użyciu pirometru. Przez krótki czas, gdy płomień przechodził przez element, temperatura na powierzchni była o ok. 50°C wyższa. Gdy płomień przesunął się dalej, temperatura na powierzchni szybko wyrównywała się z temperaturą na dolnej stronie elementu.

## Ocena prób i dyskusja wyników

Badane próbki poddano szczegółowej analizie i porównano z odpowiednimi badaniami materiałów w celu zobrazowania zmian we właściwościach mechanicznych. Z badanych elementów pobrano różne próbki. Były to próbki do rozciągania pobrane w kierunku podłużnym i poprzecznym oraz próbki do udarowych prób zginania w kierunku poprzecznym. Pobrano także próbki do badań mikrograficznych. Dalsze próbki pobrane z kilku badanych elementów przeznaczone były do oznaczenia w nich zawartości wodoru.

## Wpływ rodzaju gazu na proces korozji

Z tych procesów można wyciągnąć wnioski odnośnie tworzenia się warstwy korozyjnej na skutek oddziaływania metanu i propanu. Proces korozji jest intensyfikowany na skutek wcześniejszego czyszczenia strumieniowo-ściernego powierzchni, ponieważ warstwy rdzy i zgorzeliny opóźniają proces korozji przez hamowanie przepływu elektronów. Zjawisko to regulowano dzięki zastosowaniu do podgrzewania płomienia od neutralnego do lekko utleniającego. Spalanie następuje w dwóch etapach, ponieważ nie ma wystarczającej ilości tlenu, aby mogło przebiegać w reakcji jednostopniowej. Poniższe równania ilustrują dwustopniowy proces spalania przy zastosowaniu propanu – równania (1) i (2) oraz acetyleny – równania (3) i (4), a także (2):



Równania reakcji z zastosowaniem metanu pominięto, ponieważ reakcje te przebiegają podobnie jak przy spalaniu propanu.

Z równania (1) pokazuje, że podczas spalania propanu wytwarza się czterokrotnie więcej wody niż przy spalaniu acetyleny – równania (3) i (4). Po zapaleniu palnika następuje gromadzenie się wody wydzielonej z płomienia, w wyniku kondensacji pary

wodnej na powierzchni elementu. Proces ten jest widoczny, gdy stosuje się propan i metan, natomiast przy użyciu acetyleny następuje bardzo silne usuwanie wody z powierzchni. Wysoka temperatura płomienia i bardzo wyraźne jądro płomienia powodują szybkie odparowanie skroplonej wody. Ponadto, szybkie przekraczanie punktu rosy zapobiega skraplaniu pary wodnej. Punkt rosy spalin pochodzących ze spalania acetyleny wynosi 42°C, co również przyczynia się do zapobiegania osadzaniu się kropli na powierzchni elementu. Wynika z tego że nie występuje dostateczna ilość wilgoci, która jest potrzebna do wydzielenia jonów  $\text{OH}^-$  w celu zainicjowania procesu korozji. Oznacza to, że powierzchnia ogrzewanego elementu pozostaje metalicznie połyskująca.

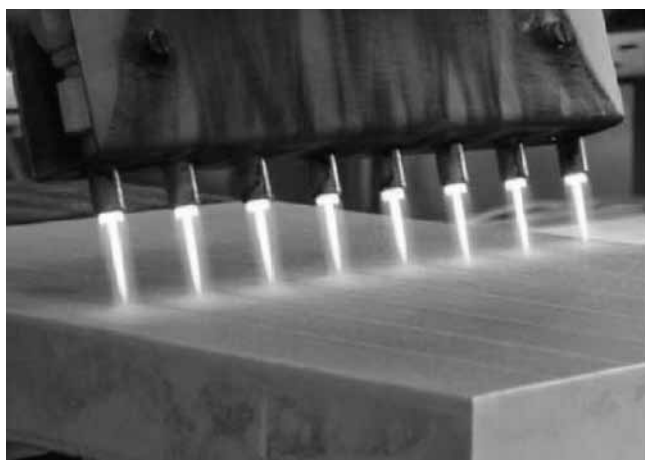
Oddziaływania te dotyczą także metanu i propanu. Obydwa te gazy dają słaby płomień i wykazują względnie niską prędkość przepływu w porównaniu z acetylenem. Ponadto, wytwarzają płomień z dużą ilością. Usuwa to wodę przed płomieniem, ale może prowadzić do osadzania się kropli po bokach palnika. Wyższy punkt rosy spalin (55°C dla propanu i 59°C dla metanu) sprzyja także powstawaniu kropli na powierzchni elementu. Potrzebny jest dłuższy czas do osiągnięcia tych wartości temperatury na elemencie, co umożliwia przebieg procesu korozji.

Poniższy przykład pokazuje w wartościach liczbowych, ile wody wytwarza się podczas spalania 1 m<sup>3</sup> paliwa gazowego. Na podstawie równań (1+4) widać wyraźnie, że uzyskuje się 4 mole wody (4 · 18 g) w wyniku procesu spalania 1 mola propanu (44 g). Natomiast tylko 1 mol wody powstaje ze spalania 1 mola acetyleny (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – 26 g). Proporcja dla propanu wynosi 1:1,636, a dla acetyleny 1:0,6923. Ponadto, propan ma gęstość 1,871 kg/m<sup>3</sup>, a acetylen 1,1 kg/m<sup>3</sup> w stanie gazowym pod ciśnieniem 1 bara, w temperaturze 15°C. Te warunki wstępne uważane są za wystarczające dla naszych badań. Spalając 1 m<sup>3</sup> propanu, wytwarza się 3,061 kg wody, natomiast acetyleny tylko 0,7615 kg. Jednakże woda ta nie wydzieliła się w 100% w postaci kropli. Po przekroczeniu odpowiednich punktów rosy woda odparowuje i ulatnia się do atmosfery. Nasze badanie uwzględnia całkowite spalanie. O 17% więcej wody uwalnia się, gdy podgrzewa się metanem aniżeli propanem.

## Podsumowanie

Próby podgrzewania pokazują, że płomień acetyleny ze sprężonym powietrzem jest najbardziej efektywny spośród badanych płomieni (rys. 3+5). Płomień ten umożliwił szybsze osiągnięcie wymaganej temperatury w porównaniu z płomieniem uzyskanym z dwóch pozostałych gazów. Podczas gdy różnica czasu potrzebnego do podgrzania elementów propanem i metanem do 150°C – w porównaniu z acetylenem – wynosiła tylko 30% i 40%, to przy nagrzewaniu do 300°C powiększyła się odpowiednio do 60% i 76%. Ponadto podgrzewanie

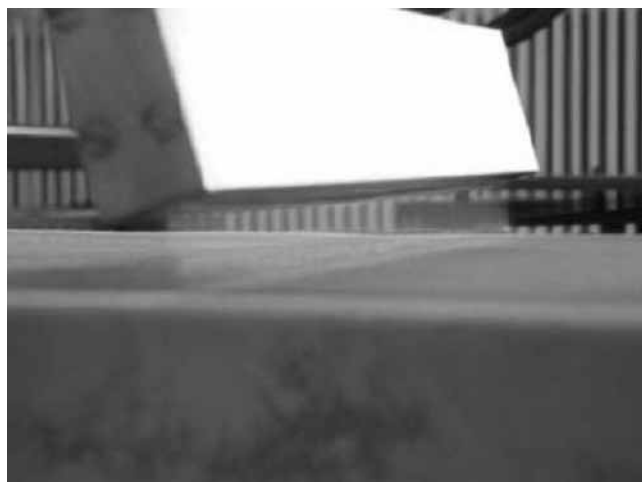
do 300°C metanem i propanem wykazało, że gazy te prędko osiągają swoją maksymalną, możliwą do uzyskania temperaturę, co poznaje się po płaskim przebiegu krzywej. W przypadku acetylenu, natomiast, prawie liniową postać wznoszącą się krzywej obserwuje się jeszcze nawet przy 300°C. Jednym z najważniejszych punktów uwydatnionych dzięki naszym badaniom jest tworzenie się wody kondensacyjnej na powierzchni podgrzewanego elementu. Wynika to z wysokiej zawartości wodoru w metanie i propanie. Woda odparowuje z powierzchni, gdy element się ogrzewa, niemniej jednak wiele śladów korozji pozostaje. Na dalszych etapach przetwarzania materiału, takich jak spawanie lub obróbka powierzchniowa, może to prowadzić do zniszczenia wytworzonej konstrukcji wcześniej niż przednio założono w obliczeniach lub badaniach.



**Rys. 3.** Płomień acetylenu ze sprężonym powietrzem  
**Fig. 3.** Acetylene-compressed air flame



**Rys. 4.** Płomień propanu ze sprężonym powietrzem  
**Fig. 4.** Propane-compressed air flame



**Rys. 5.** Płomień metanu ze sprężonym powietrzem  
**Fig. 5.** Methane-compressed air flame

Badanie poszczególnych gazów palnych i ich wpływu na proces ogrzewania pokazuje, że acetylen jest najbardziej korzystny. Po ukończeniu prób nagrzewania przeanalizowano właściwości mechaniczne elementów. Wykazały one przede wszystkim, że można wykluczyć dyfuzję wodoru do wnętrza podgrzewanego przedmiotu. Ponieważ powierzchnia nie stapia się, a wodór nie jest obecny w postaci atomowej, nie ma możliwości wzbogacenia materiału w wodór pod powierzchnią materiału.

Inne próby mające na celu ocenę właściwości mechanicznych wykazały również, że podgrzewanie nie powoduje przewidywanych szkodliwych skutków dla obrabianych elementów. Pomimo podgrzewania różnymi gazami i do różnych temperatur wytrzymałość na rozciąganie pozostawała jednakowa. Próby udarności w niższych temperaturach wykazały, że podgrzewanie nie ma wpływu na udarność. Próba twardości również nie wykazała żadnych zmian związanych z rodzajem gazu palnego i stosowaną temperaturą.

Można zatem stwierdzić, że podgrzewanie wstępne jest procesem niezbędnym w przetwórstwie stali konstrukcyjnych o wysokiej i podwyższonej wytrzymałości. Nawet jeśli nie ma jeszcze żadnych zmian w mikrostrukturze lub we właściwościach mechanicznych na tym etapie pracy, pewne okoliczności należy rozważyć zawczasu, aby mieć pewność, że praca na późniejszych etapach będzie przebiegać bezpiecznie i bez komplikacji. Istotne jest rozważenie rodzaju gazu i postaci czynnika utleniającego.