

平成 25 年度修士論文

鋼スタッド溶接部の気孔発生に
およぼす溶接条件の影響

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
材料機能設計研究室
酒井 拓哉

目次

第1章	緒言	
1-1	スタッド溶接	・・・1
1-2	気孔欠陥について	
第2章	実験方法	・・・3
2-1	スタッド溶接のシーケンス	
2-2	試験材	
2-3	実験条件	
2-4	実験装置	
2-4-1	実験装置，測定機器の仕様	
2-5	測定信号の校正	
2-6	実験評価法	
2-6-1	断面観察法	
2-6-2	溶融量の算出方法	
2-6-3	X線透過試験	
2-6-4	EPMA 試験	
第3章	各溶接方法でのスタッド溶接過程における溶接条件の影響	・・・8
3-1	鋼スタッド溶接現象	
3-2	溶接中のアーク電圧挙動	
3-3	押し込み速度の違い	
3-4	気孔の発生状況	
3-4-1	溶接部の断面写真	
3-4-2	X線透過試験結果	
3-4-3	気孔率について	
3-5	各条件が気孔発生に与える影響の検討	
3-5-1	Al, Ar, 押し込み速度が気孔発生に与える影響	
3-5-2	入熱量，押し込み距離，溶融体積が気孔発生に与える影響	
第4章	考察	・・・12

- 4-1 アルミの脱酸作用について
- 4-2 Al と Ar がアークに与える影響
- 4-3 気孔の発生とアークの安定性の関係
- 4-4 気孔の発生原因
- 4-5 フェルールなしの溶接について

第 5 章 結言

・ ・ ・ 16

参考文献

謝辞

第1章 緒言

1-1 スタッド溶接

溶接技術が本格的に発達したのは、電気エネルギーを容易に利用できるようになったからのことであり、このエネルギーを利用した代表的なものとしてアーク溶接が挙げられる。この溶接法は2つの電極間にアークを発生させ、その熱によって接合部を熔融して溶接する方法で、比較的容易に局所的に集中した高い熱エネルギーが得られるため、現在、溶接法の中で最も広範囲に利用されている。アーク溶接の歴史は古く、1802年のロシアの Petrow による「アークの研究」に端を発し、1849年にはイギリスの Staiter が「アークによる金属の溶接」の特許を、1885年にはロシアの Benardos が「炭素アークによる金属の溶接」の特許を取得しており、古くから盛んにアーク溶接に関する研究が行われている。

スタッド溶接はアーク溶接の一種で、板材に丸棒（スタッド）を垂直に溶接する手段として開発された溶接法である。スタッド溶接の原理はおおよそ次のようである。最初、母材とスタッドは接触している。通電と同時にスタッドを母材から離し、アークを発生させる。そして、1秒程度アークによってスタッド先端と母材表面を熔融させる。最後にスタッドを熔融池に押し込み、熔融金属が凝固して、溶接が終了する (Fig. 1-1 参照)。

スタッド溶接では、①大電流 (200～2500A 程度) で短時間 (1秒程度) に溶接ができ、溶接ひずみが小さく、低コストな接合法である。②溶接作業者は、スタッドをセットした溶接ガンを母材にフェルールと共に押し付け、溶接ガンのスイッチを押し、溶接終了時まで確実に垂直度を保ったまま、溶接ガンを保持すればよいだけであり、スタッドの引き上げ、押し込みは溶接ガンが自動的に行うため、溶接結果が作業者の技量に左右されにくいなどの利点があり、造船や橋梁などの構造物における大きな平板に数多くのスタッドを迅速に接合することに適している。

スタッド溶接における主要な溶接条件は溶接電流、アーク時間、スタッドの引き上げ距離および溶代である。さらに溶接ガンに取り付けられたダンパの効きを変化させることで、スタッドを母材に押し込むときの速度を変えることができる。

1-2 気孔欠陥について

溶接構造物の信頼性確保のためには溶接欠陥の防止が必要不可欠である。その中でも気孔欠陥防止は重要な課題である。気孔欠陥は溶接アークや溶接金属の周囲にある気体が溶接金属中の中に気泡として取り込まれて生じる。

鋼スタッド溶接では同研究室の山田らによる研究（鋼スタッド溶接における溶融・凝固過程に関する基礎的研究 平成 23 年度三重大学大学院修士論文^[3]）でアーク放電現象とスタッドの動きが互いに関連しながら溶接中に変化する現象を各種溶接条件およびスタッド先端形状を変化させた場合について、実際の電流、電圧値およびスタッド変位を測定し、鋼スタッド溶接における溶融・凝固現象を総合的に検討が行われた。その際に、様々な溶接条件において溶接部にしばしば気孔欠陥が生じることが分かった。スタッド溶接ではフラックスの使用やシールドガスなど積極的な酸化防止策は講じられていない。

本研究ではスタッド溶接の性能改善および適用範囲の拡大を意図して、スタッド溶接における酸化防止策の積極的適用を試みた。

気孔抑制に関係が大きいと思われる条件を説明する。まず、通常のスタッド溶接ではスタッド先端に埋め込まれている約 0.1g のアルミボールによる脱酸作用により気孔抑制が行われているといわれている。（Fig. 1-2 参照）

同研究室の藤原による研究（ガスシールドおよびフラックスを利用した鋼スタッド溶接部の気孔抑制 平成 24 年度三重大学大学院修士論文）によりシールドガスにアルゴンを使用すると気孔抑制の効果があることが明らかにされている。ガスシールドの役割はアークや溶融池を覆い大気中の窒素が溶融池に入るのを防止することにある。

溶接時のスタッドの押し込み速度の違いにより溶接金属の凝固過程や溶接金属中のガスに変化が生じることが考えられる。

スタッド溶接ではフェルールと呼ばれる耐熱性の磁器が使われている。（Fig. 1-2 参照）フェールの効果はアーク発生中に空気を遮断して溶接金属と空気との反応を防ぐことなどがあるが気孔にどのような影響があるのかは明らかにされていない。

本研究ではアルミボールの有無、アルゴンシールド、溶接時の押し込み速度、フェールの有無を変化させて気孔発生を抑制することを目的として実験を行った。

第2章 実験方法

2-1 スタッド溶接のシーケンス

溶接シーケンスの概略図を Fig.2-1 に示し、同図に各値の名称を記した。溶接ガンのスイッチが ON になると同時に電流およびスタッド変位が立ち上がる。その後、電流値は図に示すように、階段状に上昇し、各期間の電流値は一定である。スタッドの変位については、正の方向をスタッドの引き上げ距離とし、負の方向をスタッドの押し込み距離とすると、同図に示すような変化を溶接中にする。

2-2 試験材

S15C の丸棒を用いて、 $\phi 19$ のスタッドを模して先端に $\phi 6$ 、厚さ 1.3mm のアルミニウム板を埋め込んだ試験片および先端に $\phi 5$ 、高さ 1.5mm の鋼の突起を付した 2 種類の試験片を作製した。詳細な寸法および形状は Fig.2-2 に示すとおりである。Fig.2-3 に示すように板材に一般構造用圧延鋼材（JIS SS400）を母材として使用した。詳細な寸法および形状は同図に示すとおりである。

2-3 実験条件

2 種類の試験片をそれぞれ大気中および Ar シールド下で、 $70 \times 70 \times 16 \text{mm}$ (JIS SS400) の母材に直流溶接機で下向溶接した。各条件において、スタッドガンのダンパ強さを調節してスタッドの押し込み速度を 0.67mm/s (Low), 2mm/s (Medium), 80mm/s (High) の 3 種類に変化させた。押し込み速度の違いによるスタッドの変位を Fig に示す。またフェルールを使用せずに同様の実験を行った。極性は正極性（スタッド負極－母材正極）で行った。同条件で 3 回溶接を行った。

以下に示す条件はダイヘンスタッドの $\phi 19$ のスタッドでの推奨値であり今回の実験では固定値とした。

溶接電流	1500A
アーク時間	1S

溶け代	5mm
引上げ距離	2.5mm
パイロット電流	自動設定
パイロット時間	0.12s
ポストヒート時間	0.2s

2-4 実験装置

実験装置の概略図を Fig.2-4 に示す。レーザ変位計でスタッドの変位を測定し、黒く示した点の間での電圧をアーク電圧とした。シャント抵抗から電圧を測定し溶接電流を測定する。アルゴンシールド法の概略図を Fig.2-5 に示す。スタッド先端をアルゴンガスで包被しアルゴン雰囲気中で溶接を行うため、ブリキ製の缶（内径 130mm 高さ 100mm）を加工しチャンバーを制作した。チャンバーは左右高さ 100mm の位置にガスパを取り付けた。溶接時は内部の気密性を保つためにチャンバー上部はゴム板で蓋をし、気体拡散を考慮しガス流入後 30 秒後から開始した。フェルールを使用しない条件では従来のフェルール抑えに変えて銅の丸棒と木材で母材を抑える治具を作成して使用した。概略図を Fig.2-6 に示す。

2-4-1 実験装置，測定機器の仕様

溶接機には直流溶接機（ダイヘンスタッド社製 MRN-2500）を，溶接ガンにはダイヘンスタッド社製（GS-202）のものを使用した。溶接機および溶接ガンの仕様を以下に記す。

・アークスタッド溶接用直流溶接機

定格周波数	50/60Hz
定格入力電圧	200V
定格入力電流	686A
定格（最大）出力電流	2000A（2500A）
出力電流範囲	200～2500A
溶接時間	0.01～2.5s
パイロット電流	13～590A，自動設定
パイロット時間	0.001～0.15s
ポストヒート時間	0.05～0.24s

適用スタッド径

 $\phi 8 \sim \phi 25\text{mm}$

・GS-202

引き上げ距離調整範囲 1～6mm

溶接電流の測定には、シャント抵抗器（YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC 製 TYPE221）を使用した。シャント抵抗器の仕様は以下の通りである。

定格電流 500A

定格出力電圧 50mV

溶接中のスタッド変位の測定は、光変位センサ（SUNX 製 LM-10）を使用した。溶接ガンの軸部に地面と平行な受光板を取り付け、その受光板の動きを光変位センサで測定した。光変位センサの仕様は以下の通りである。

測定範囲 $\pm 10\text{mm}$

測定中心距離 50mm

分解能 10Hz－1 μm , 100Hz－3.5 μm , 1kHz－10 μm

溶接電流・電圧、D/A 電圧信号出力を記録するためにオシロスコープ（NEC 製 サーマルドットレコーダ オムニエースⅢ RA2300）を使用した。また、アンプユニットには2CH 高速DC アンプユニット（AP11－103）を使用した。オシロスコープ、アンプユニットの仕様は以下の通りである。

・RA2300

ボード PC OS: Windows XP－E

CPU: Celeron 650MHz

HDD 容量 40GB

・アンプユニット

許容入力電圧 $\pm 500\text{V}$

(AP11-103)

最高サンプリング時間 1 μs

2－5 測定信号の校正

すべての測定機器の信号はオシロスコープに取り込むことで表示させた。オシロスコープではすべての信号が電圧信号として表示されるので電圧信号をそれぞれの単位に公正する必要がある。以下に各換算方法および値を示す。

・溶接電流

シャント抵抗器の定格電流（500A）と定格出力電圧（50mV）から単位の換算を行い 1V=10kA とした。

・スタッド変位

光変位センサの受光部には鋼につや消しの塗料を塗ったものを用いた。光変位センサの換算にはマイクロメータを使用し、 $\pm 10\text{mm}$ の範囲で受光部を移動させ、光変位センサの出力電圧を測定し換算を行った。測定結果を Fig.2-7 に示す。この結果から $1\text{V}=1.99\text{mm}$ とした。

2-6 実験評価法

2-6-1 断面観察方法

スタッド溶接部の形状および溶接欠陥の有無を観察するため、溶接部の中心を切断した。切断後は#2000 番までのカーボランダム研磨紙を用いて研磨を行った。さらに、バフ研磨によって観察面を鏡面に仕上げた後、硝酸 5cc に対してエタノール 100cc を混ぜたものに 10 秒浸け、腐食し断面観察を行った。

2-6-2 溶融量の算出方法

試験片の縦断面写真を PC ソフト（ソフト名：Simple Digitizer、バージョン：6.0）で座標データを取り、プログラミング言語 BASIC で作製した体積計算プログラムから溶融体積の計算を行った。溶融体積計算についてはスタッドおよび母材溶融量を溶接部中心の断面から求める。スタッド中心軸 ($x=0$) で母材溶融面積を左半分と右半分に分け、それぞれの面積を $x=0$ で回転させ、平均したものを母材溶融量とした。スタッドの溶融量は、Fig.2-8 の斜線で示す範囲の体積を母材の時と同様にして求め、その体積を同図に示す点線で囲まれた体積（溶接する前のスタッドの形状から求めた体積）から引いた値をスタッドの溶融量とした。

2-6-3 X 線透過試験（JIS Z 3104）

本研究では溶接部の気孔を確認するために「JIS Z 3104：1995 鋼溶接継手の放射線透過試験」に準じ X 線透過試験を行った。この試験を行うにあたって溶接継手を Fig.2-9 に示す寸法に切削およびフライス加工を施した。また、X 線透過試験結果の一例を Fig.2-10 に示す。

2-6-4 気孔率の測定

気孔の判別方法として、気孔の合計面積を溶接金属の面積で除した値を気孔率と定義

した．X 線透過写真と断面写真の両方で測定を行った．

2-6-4 EPMA 試験

試験片の溶接部断面の元素分析を行うにあたり，日本電子社製 JXA-8900R の電子線マイクロアナライザを用いて EPMA 測定を行った．

第3章 実験結果

3-1 鋼スタッド溶接現象

溶接中の全過程における電流値の変化、電極間電圧の変化およびスタッドの変位について、測定の代表例を Fig.3-1 に示す。溶接ガンのスイッチを入れると僅かに電流が流れ、その後、定電流制御によってパイロットアーク、主アーク期間ではほぼ一定の電流が流れる。電圧値は主アークに移行した初期に極大を示し、その後、減少する。また、主アーク期間中に急激な電圧降下が生じる場合もあった。スタッドは電流の立ち上がりと同時に引き上げられ、溶接中、一定に保たれた後、最後に押し込まれる。

3-2 溶接中のアーク電圧挙動

各条件での溶接中の溶接電流[kA]、電圧[V]、スタッドガンの変位[mm]を Fig.3-2~3-アーク電圧の時間変位を Fig.3-2~3-25 に示す。アルミを埋め込んでいない条件は Fe と表記している。同条件で3回ずつ溶接を行い黒、赤、青色で重ねて表示した。次にフェルルールを使用したときの電圧の実験結果を Fig.3-26 に示し、フェルルールを使用しなかったときの電圧の実験結果を Fig.3-27 に示す。各条件で9個のデータを重ねて表示した。フェルルールを使用しない場合、最初に電圧が立ち上がってから終了するまでに電圧降下が起こった。これはアークが発生しているときに溶けたスタッド側の溶接金属が垂れ下がりアーク長が短くなるためであると考えられる。アークの発生直後は何も対策をしていないと高く、アルミとアルゴンを使用すると溶接初期の電圧が低くなった。何も対策をしていないと急激な電圧降下である短絡が多く起こった。スタッド溶接におけるアーク電圧はアーク長に対応しており、溶接中の急激な電圧降下はスタッド側から溶けた金属が垂れ下がり母材に接触することでアークの発生を阻害されることで起こっている。アルミとアルゴンを使用すると短絡の回数が減少した。フェルルールを使用しない場合、条件によらず最初に電圧が立ち上がってから上昇し続ける。また電圧が急激に上がる現象が起こっている。これはスタッドと母材が離れてしまったためアーク長が大きくなりアークの発生が阻害されて起こったと考えられる。上がったときの電圧は135Vでありこれは回路電圧と一致している。

3-3 押し込み速度の違い

溶接時のスタッドガンの押し込み速度の比較を Fig.3-28 に示す。スタッドガンのダンパの強さを強にすると押し込まれる速度は遅くなりダンパが効いてからの押し込み速度は 0.67mm/s となっている。ダンパの強さを中にすると押し込み速度は 2mm/s となる。ダンパの強さを弱にするとダンパはほとんど効かず 80mm/s で押し込まれる。

押し込み速度と溶接後のスタッドの押し込み距離の関係を Fig.3-29 に示す。スタッドの押し込み距離の設定値は溶代の 5mm とアルミボールの高さ 1.5mm を合計した 6.5mm である。各プロットは3回の実験の平均値である。押し込み速度が増加するのにつれて押し込み距離も増加していることが確認された。

3-4 気孔の発生状況

3-4-1 溶接部の断面写真

条件別の溶接部の断面写真を Fig.3-30~Fig.3-37 に示す。気孔には様々な種類があるが本実験では気孔の種類は区別せずに測定した。フェルルールを使い対策をしていない条件では多くの気孔が発生したが対策を行った条件では気孔は減少している。フェルルールを使用していないとどの条件でも溶接は成功しなかったか多数の気孔が発生した。

スタッドと母材の光学顕微鏡写真を Fig.3-38 に示し、各条件での溶接金属の光学顕微鏡写真を Fig.3-39~3-42 に示す。溶接金属の組織はどの条件でも違いは見られなかった。

3-4-2 X線透過試験結果

本実験では、気孔測定を行うにあたり X 線透過試験結果を用いておりフェルルールを使用した条件で各条件における X 線写真結果を Fig.3-43 に示す。写真の白い部分は溶接部の横断面で中の黒い円形の斑点は気孔であり、不規則の黒い曲面は溶接欠陥部である。気孔防止の対策を全く施さない場合には明瞭に気孔が観察され、この場合には気孔は大きく、また多数観察された。アルミニウムの使用あるいはアルゴンシールドの対策を施すことによって気孔発生が抑制された。どちらの対策も行くとよりばらつきがなく気孔発生が抑制された。フェルルールを使用していない条件はどの条件も溶接が成功しな

かったため X 線透過試験をすることはできなかった。

3-4-3 気孔率について

フェルールを使用した条件の試験片の X 線透過試験と断面観察の二つの測定方法による気孔率と気孔数の結果の比較を Fig.3-44 に示す。X 線透過試験の結果と断面観察の結果とは大まかに一致した。気孔数は、両者の測定値は大まかには比例しているが、X 線透過試験の測定値は断面観察の測定値より検出できる気孔数が大きくなった。ここからは断面による測定値を用いた。

気孔数と気孔率の関係を Fig.3-45 に示す。気孔数が増加するにしたがって気孔率も対数的に上がっている。

3-5 各条件が気孔発生に与える影響の検討

3-5-1 Al, Ar, 押し込み速度が気孔発生に与える影響

フェルールを使用した条件で、対策をしていない条件、Al を埋め込んだ条件、Ar シールドの条件、Al と Ar をどちらも使用した条件における気孔率を Fig.3-46 に示す。x 軸は押し込み速度を表していて y 軸は気孔率を表している。条件別にプロットを色分けしてある。同条件で 3 つプロットして平均値を線で表した。同図の縦軸は対数尺であり、気孔が認められなかった場合には便宜的に 0.005% の位置にプロットした。気孔率が 10% を超えると接合部が形成されたとは言えない。対策をしなかった条件では全ての試験片で数%～数十% の高い気孔率を示したが、スタッド先端のアルミニウムや Ar シールドなど対策した場合には気孔率は 3% 以下と大きく減少した。気孔数においても気孔率と同様の傾向を示した。またどちらの対策も行くとより気孔抑制の効果が大きいことが分かる。押し込み速度の増加に伴って気孔率が減少する傾向が確認された。

3-5-2 入熱量、押し込み距離、溶融体積が気孔発生に与える影響

押し込み量と気孔発生との関係を調べるために Fig.3-47 に押し込み距離と気孔発生との関係を示す。押し込み距離が小さいと気孔率が高くなっている。十分にスタッドが押し込まれていれば溶接金属中のガスは外へ追い出されやすくなり気孔の抑制につながる。

スタッド溶接において溶接金属はアーク放電で発生した熱によって、スタッドと母

材が溶融・凝固し形成される．そこで，実測値の入熱量を以下の式より求めた．

$$H = IVt$$

(H：入熱量，I：溶接電流，V：アーク電圧，t：溶接時間)

この式を用いて入熱を求めて，入熱と気孔発生との関係を調べるために Fig. 3-48 に入熱と気孔発生との関係を示す．対策をしていない条件と比べて AI を用いると入熱量が大きくなり Ar シールドでは入熱量が小さくなった．どちらも使用すると入熱量は両者の中間ほどになり対策をしていない条件と同程度となった．条件毎に比較すると入熱と気孔発生には関係がみられなかった．

溶融体積と気孔発生との関係を調べるために Fig.3-49 に溶融体積と気孔発生との関係を示す．入熱の場合と同様に，対策をしていない条件と比べて AI を用いた条件では溶融量が大きくなり Ar シールドの条件では溶融量が小さくなった．入熱と溶融体積の関係を Fig.3-50 に示す．入熱の増加に伴い溶融体積も増加することが確認された．条件毎に比較すると溶融量と気孔発生には関係がみられなかった．

第4章 考察

4-1 アルミの脱酸作用について

フェルールを使用したときアルミニウムを埋め込むと気孔の発生が減少した理由を考察するために EPMA 観察を行った。ダイヘンスタッド社の $\phi 19$ のスタッドを使用した。Fig.4-1 にアルミニウム有りの試験片とアルミニウム無しの試験片において定量分析を行った位置と結果を示す。定量分析の範囲は半径 $20\mu\text{m}$ である。本実験は半定量検査のためおよその値である。また炭素と気体である酸素は特性 X 線の波長のピークが一定に出ず、表面のさびなどにも影響されるために、本実験での値は実際よりも高い値を示している。シリコンキルド鋼であるスタッドと SS400 である母材を比較する。どちらにもアルミニウムは存在していないが標準のスタッド試料の溶接金属からはアルミニウムが検出された。このことからスタッド先端のアルミボールが溶接後も溶接金属中に存在していることが分かった。溶接金属中の酸素の割合をアルミニウム有りの条件とアルミニウム無しの条件で比較するとアルミニウム有りの条件ほうが大きい。よってアルミはアルミナの形で溶接金属中に介在していると考えられる。光学顕微鏡で溶接金属を観察すると Fig4-2 の左図のような介在物と思われるものが多数確認された。その中から 3 点を定量分析で調べた。この介在物の SEM 画像が Fig4-2 の右図である。介在物の中心を点分析するとアルミナと同様な組成を示した。溶接金属中の酸素がアルミニウムと結合してアルミナとなったと考えられる。

4-2 Al と Ar がアークに与える影響

条件によってアーク電圧に違いがみられたため、アーク発生直後の 0-0.2s 間の平均電圧を初期平均アーク電圧、アークが切れる直前の 0.8-1s 間の平均電圧を終期平均アーク電圧として、条件別に Fig.4-3 に示す。上図は初期平均アーク電圧を示していて、下図は終期平均アーク電圧を示している。初期平均アーク電圧は対策なしの条件が最も高く Ar と Al を使用すると減少した。スタッド先端の Al の一部が電離してイオンになりアーク電圧に影響を与えていると考えられる。シールドガスである Ar はプラズマの雰囲気ガスとなるので、アークプラズマの熱源特性は使用するシールドガスの熱力学・輸送特性に依存する。アーク中に 2 原子分子（活性ガス）があるとそれらが原子に解離す

るときに熱を奪う。また、アークを覆っているアークを覆っているシールドガスによりアークが強制的に冷やされると、アークは熱損失を抑制するためにその断面積を収縮しようとする。この現象を熱的ピンチ効果と呼ぶ。この効果により単原子であるアルゴン（不活性ガス）をシールドガスとして使った場合比較的幅の広いアークになる。アークの幅が広くなることによってアルゴンシールド下のとき平均電圧が大気中のときと比べて低くなると考えられる。終期平均アーク電圧はどの条件でもおよそ 27V で一致している。対策なしのときにばらつきが目立つのは短絡が起こっているためである。Al と Ar を使用することによるアークの違いは初期だけ現れ、時間がたつと影響がなくなる。Al と Ar の両方を使用すると初期と後期の電圧が変わらないことが確認された。アークが安定することにより気孔の抑制につながっていると考えられる。

4-3 気孔の発生とアークの安定性の関係

条件別の短絡回数と短絡開始時間の関係を Fig.4-4 に示す。対策なしと Ar シールドの条件では短絡の回数が多く短絡開始時間も早いがアルミニウムを用いるとどちらの値も改善されている。Al がイオン化するとアークが安定して持続すると考えられる。特にどちらの対策も行くと短絡はほとんど起こらず安定した溶接が行われた。アークが短絡するとその間にガスが溶接金属中に取り込まれて気孔が発生しやすくなると考えられる。

4-4 気孔の発生原因

溶接金属中の気孔の発生原因について考察する。まず対策をしていない条件では全ての試験片で多くの気孔が発生している。大気は大部分が窒素なので窒素が原因である可能性が高い。雰囲気中に窒素と酸素ガスが共存すると溶接金属の窒素量が著しく増加すると知られている。この原因はアークの高温で窒素と酸素と二酸化炭素などが NO または NO₂ ガスに結合するからであると考えられる。発生した窒素ガスがアーク下で溶接金属中に溶け、溶接金属が凝固すると溶解度が下がることによって窒素ガスが析出されて気孔が発生する。

Ar シールド下では大気が溶融金属と接することを防止したため気孔が減少した。本実験での溶接中のアルゴン濃度を求める。

溶接時のアルゴンガス濃度を求める.

V : 容器の体積 [mm³]

Q : 容器に入る流量 [mm³]

Δx : 酸素濃度 [-]

Δt : 時間 [S]

$$\Delta x V = -Q x \Delta t$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-Q x}{V}$$

$$\frac{dx}{x} = \frac{-Q}{V} dt$$

$$\ln x = \frac{-Q}{V} t + C$$

$$x = e^{\frac{-Q}{V} t + C}$$

$$t = 0 \text{ のとき } x = 0.21$$

$$C = -1.56$$

$$x = e^{\frac{-Q}{V} t - 1.56}$$

$$V = 1.3, Q = 5, t = 0.5 \text{ を代入}$$

$$x = e^{-3.48} = 0.0308$$

以上より酸素濃度は 3.08%なのでアルゴンガス濃度は 96.92%となる.

発生した気孔はシールドガスである Ar ガスが物理的に巻きこまれて発生したものであるか、または今回の実験では溶接時のアルゴン濃度は 96.92%であり大気を完全に遮断することはできていないので窒素ガスにより発生したものである.

先端に Al を使用すると、アーク下で溶接金属に溶けた窒素ガスが気孔として放出する前にアルミニウムと結合することにより気孔防止になっていると考えられる.

4-5 フェルルールを使用しない溶接の失敗原因

フェルルールを使用しない条件では溶接が失敗した原因を考察するため、フェルルールの有無による入熱と溶融体積の関係の比較を Fig.4-5 に示す。フェルルールを使用すると入熱は約 50KJ に集中しているが、使用しない場合入熱のばらつきが非常に大きい。そのため溶融体積も比例して大きくなっている。溶融した金属の詳細な内訳を Fig.4-6 に示す。上図がフェルルールを使用した条件の結果で下図がフェルルールを使用しなかった条件の結果である。比較するとスタッドの溶融体積は変わらないがフェルルールを使用しないときの母材側の溶融体積は入熱に比例して増加していることが確認された。フェルルールを使用しないとき、母材側の溶接金属が大気中に飛び散ってしまいアーク長が長くなることによって入熱が大きくなると考えられる。

第5章 結言

各溶接法でのスタッド溶接過程における溶接条件の影響と気孔におよぼす溶接条件の影響を検討し、次の結果が得られた。

- 押し込み速度が増加すると気孔は減少する。
- スタッドに埋め込まれた Al と Ar シールドを使用すると気孔抑制の効果が大きい。同時に使用すると効果はさらに大きくなる。
- アルミニウムは溶接後も溶接金属中に存在する。
- Al は短絡を抑える効果がある。
- アーク電圧が安定すると気孔が抑制される。
- フェルルールを使用しないと母材側の溶融金属が留まらずアーク長が大きくなるためアーク電圧が上がる。

参考文献

- [1] 日本スタッドウェルディング株式会社 :
「スタッド溶接の歴史 (2002)」2013 年 1 月現在 URL : <http://www.nsw-j.com>

- [2] 西川 和一 : スタッド溶接の原理と応用分野
溶接学会誌 第 71 巻 (2002) 第 8 号 575-580

- [3] 山田 有希 : 鋼スタッド溶接における溶融・凝固過程に関する
基礎的研究 平成 23 年度三重大学大学院修士論文

- [4] 藤原佳祐 : ガスシールドおよびフラックスを利用した鋼スタッド溶接部の
気孔抑制 平成 24 年度三重大学大学院修士論文

- [5] 森本 朋和 : ガスシールドアーク溶接における気孔防止とその防止法
溶接学会誌 第 75 巻 (2006) 第 7 号 560-564

- [6] 田代 真一 , 田中 学 : アーク溶接におけるプラズマ特性
核融合学会誌 第 88 巻 (2012) 第 5 号 276-280

- [7] 益本 功 , 篠田 剛 : 溶接金属の気孔とそのガス組成
溶接学会誌 第 41 巻 (1972) 第 4 号 354-367

- [8] 小林 卓郎 , 桑名 武 , 菊池 靖志 : 軟鋼溶接金属の窒素含有量および気孔
溶接学会誌 第 35 巻 (1960) 第 3 巻 237-245

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切にご指導を賜りました三重大学工学部鈴木実平教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝します．

また，同じスタッドの研究者として相談にのっていただいた同研究室の中世古圭基さん，内田拓磨君に深く感謝致します．さらに本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生の方々，学部生の皆様方に深く感謝致します．

最後に幾多のご協力を頂きながら，個々に御氏名を掲載できなかった方々に対し，その非礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます．

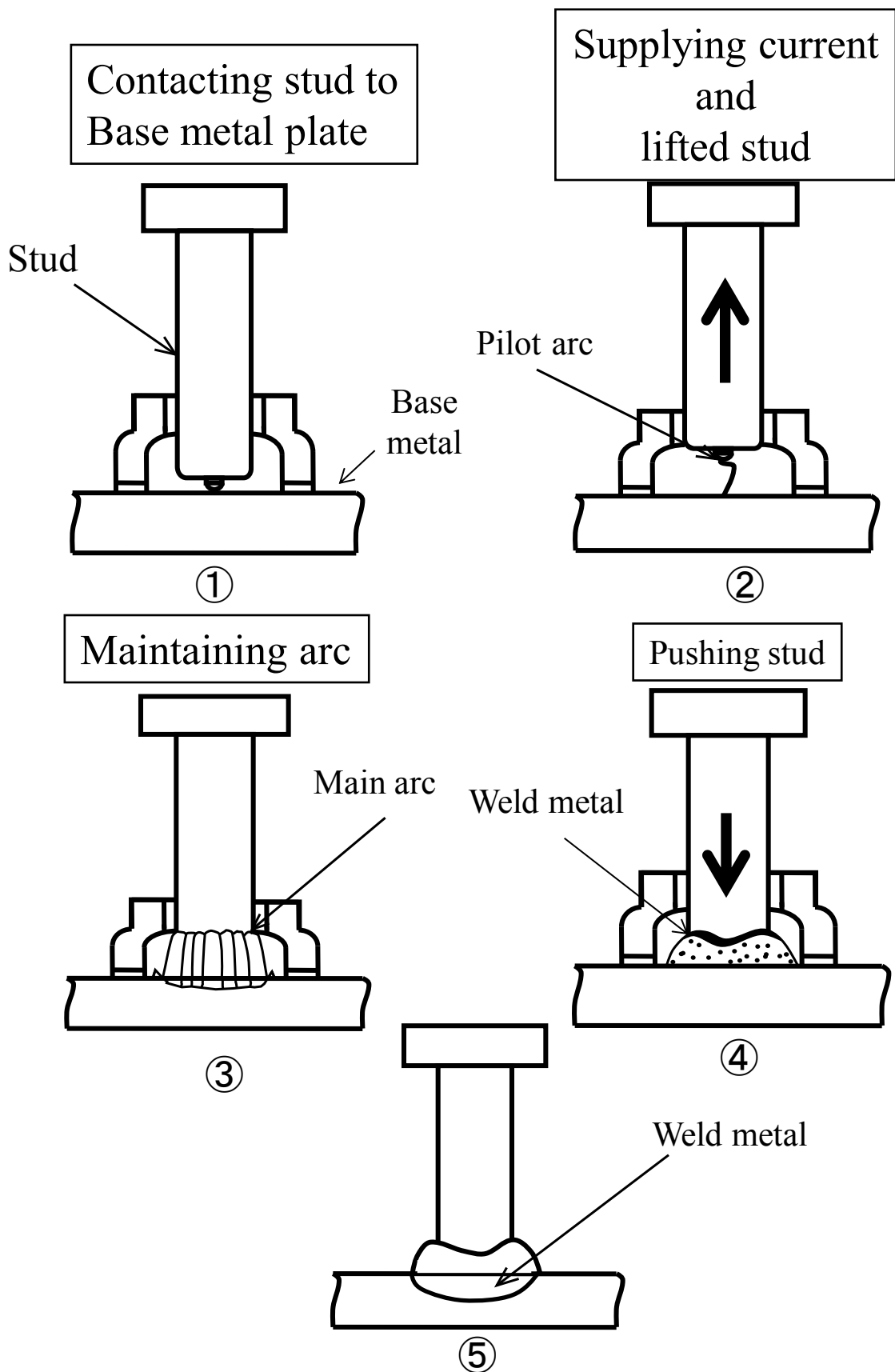


Fig. 1—1 Process of stud chart

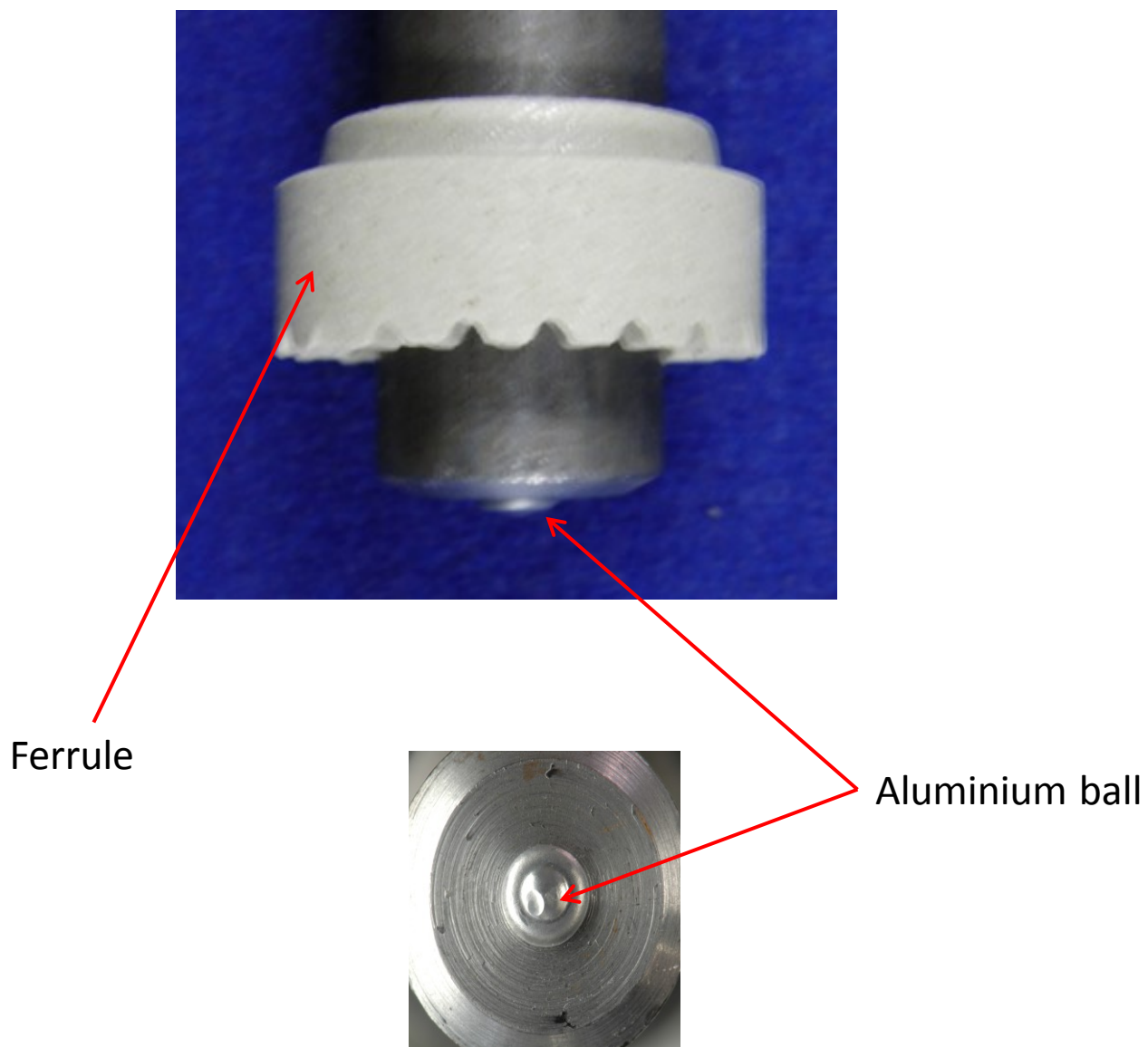
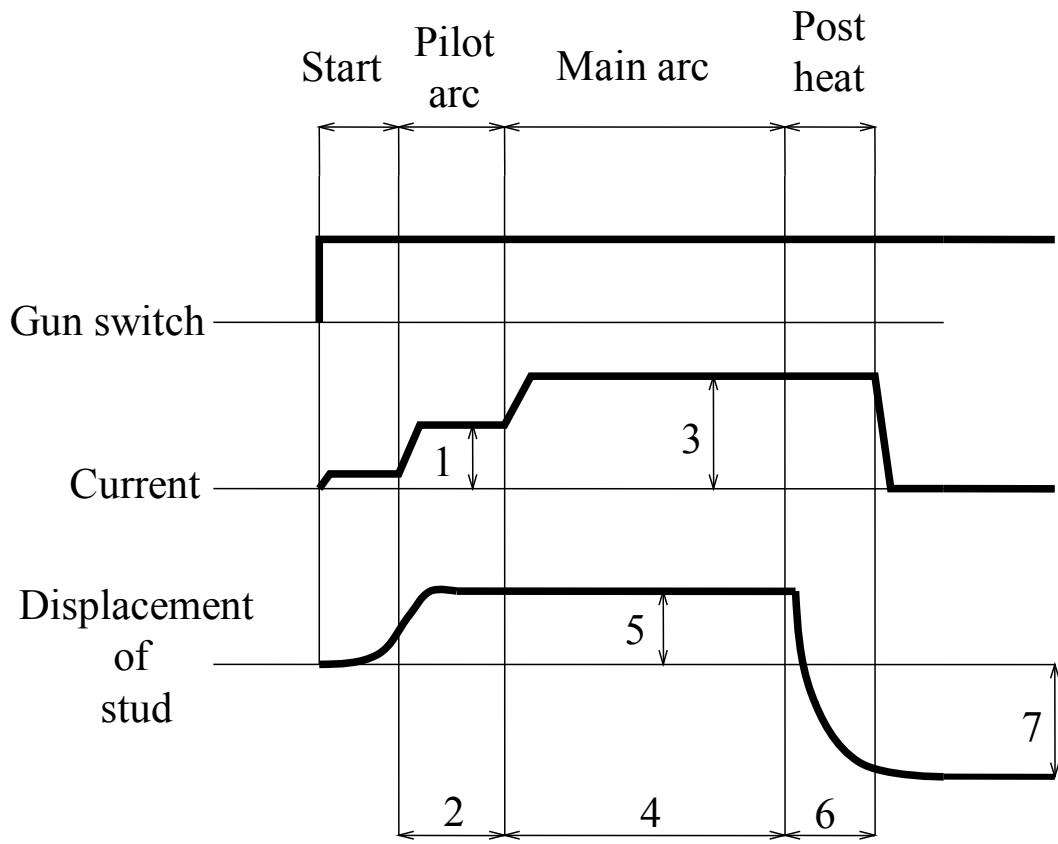


Fig. 1—2 Shape of ferrule and aluminium ball



1 : Pilot current (I_{pi})

2 : Pilot time (t_{pi})

3 : Welding current (I_{main})

4 : Arc time (t_{arc})

5 : Distance of lifting stud (L)

6 : Post heat time (t_{pi})

7 : WA^*

* WA is pushing a distance of stud .

Fig.2—1 Stud welding sequence

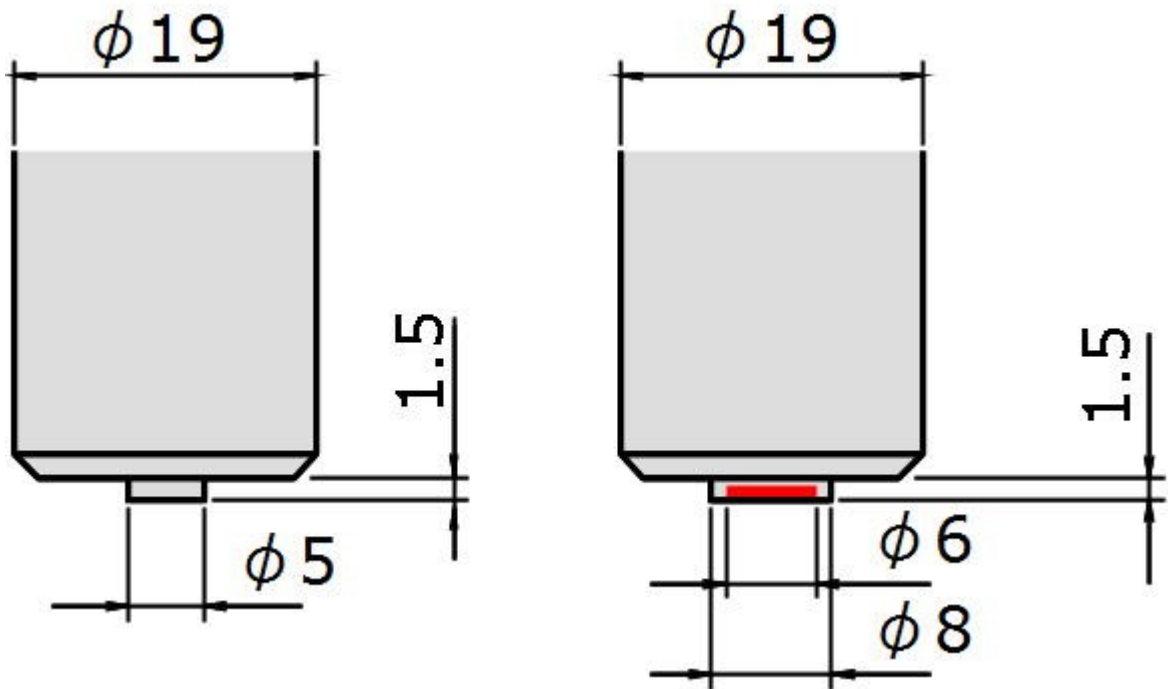


Fig.2—2 Dimensions of stud tip

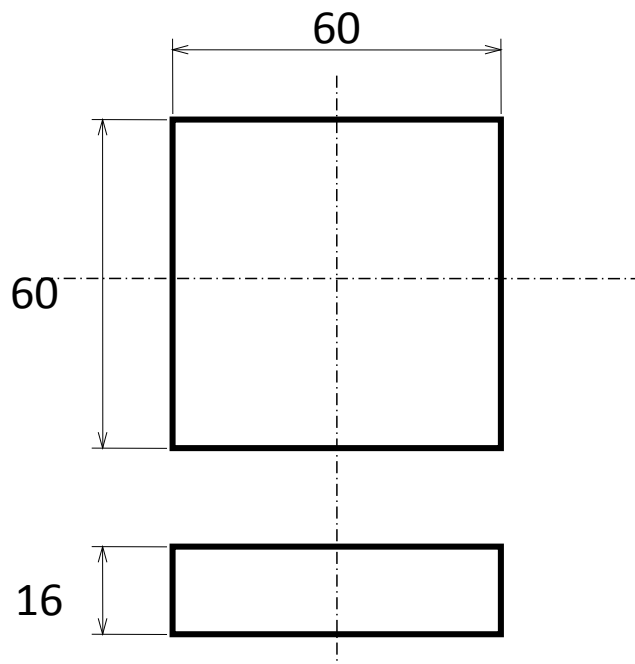


Fig.2—3 Dimensions of base metal plate

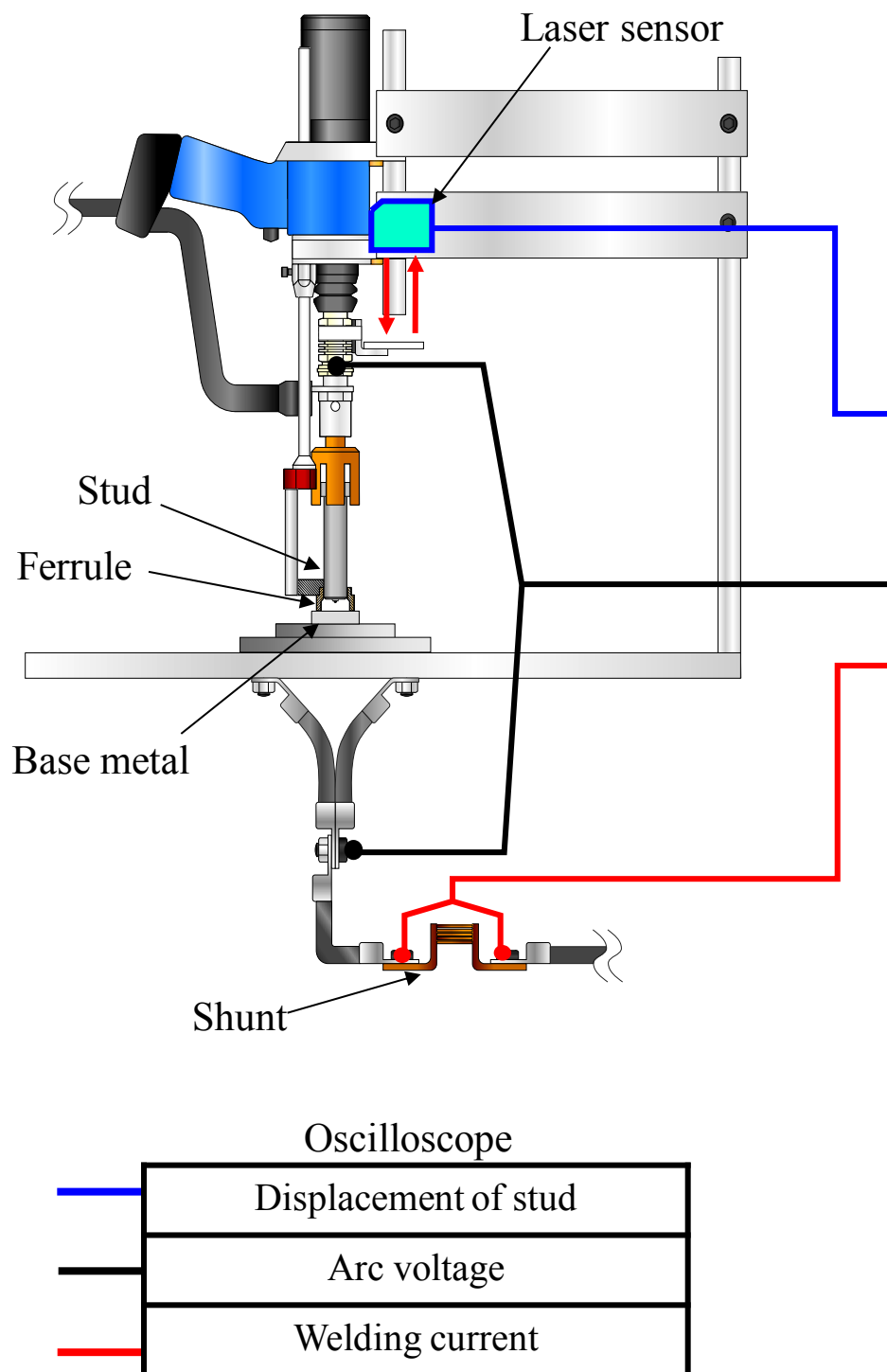


Fig.2—4 Regular experimental equipment of stud welding

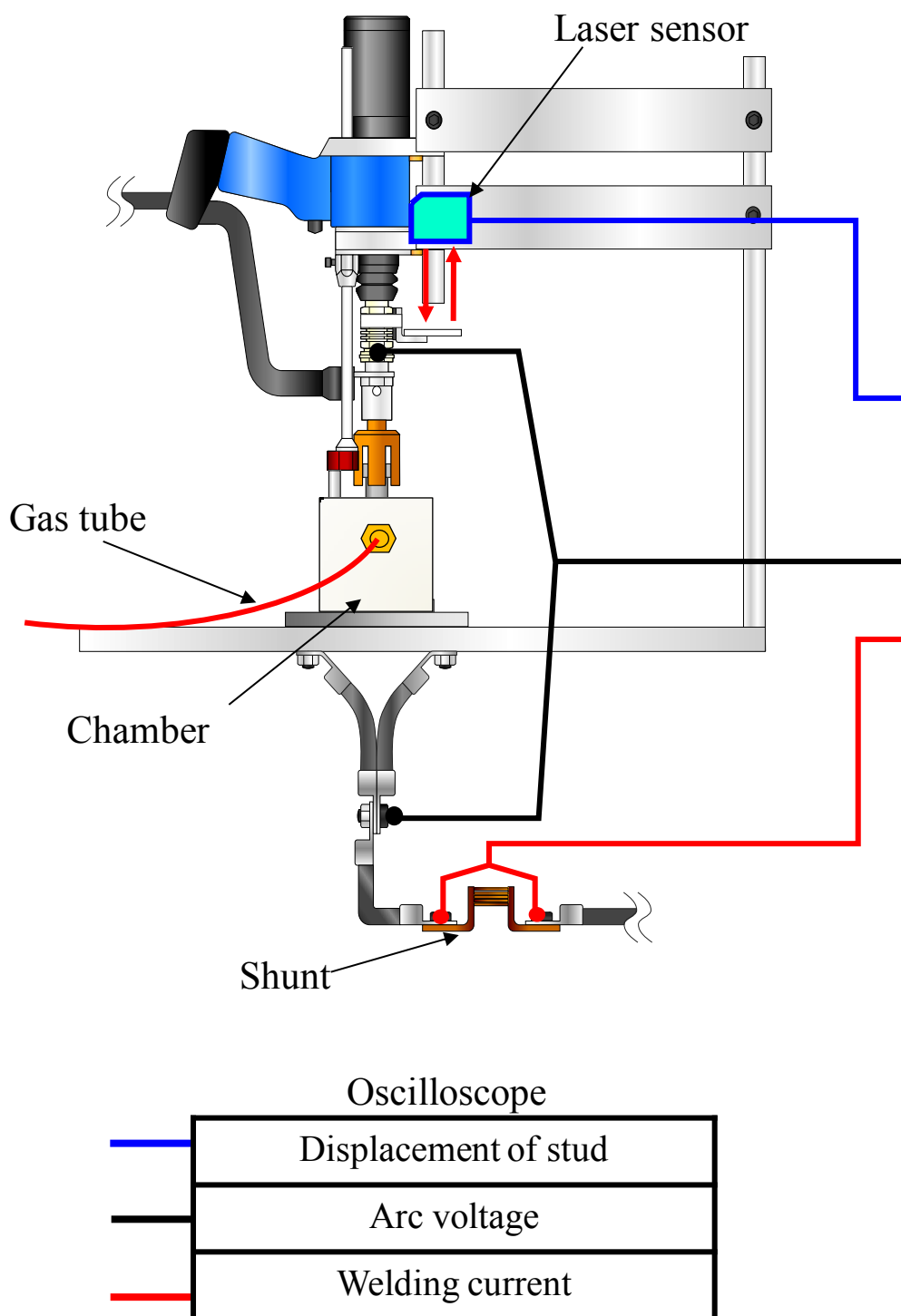


Fig.2—5 Experimental equipment of stud welding equipped container for argon shielding

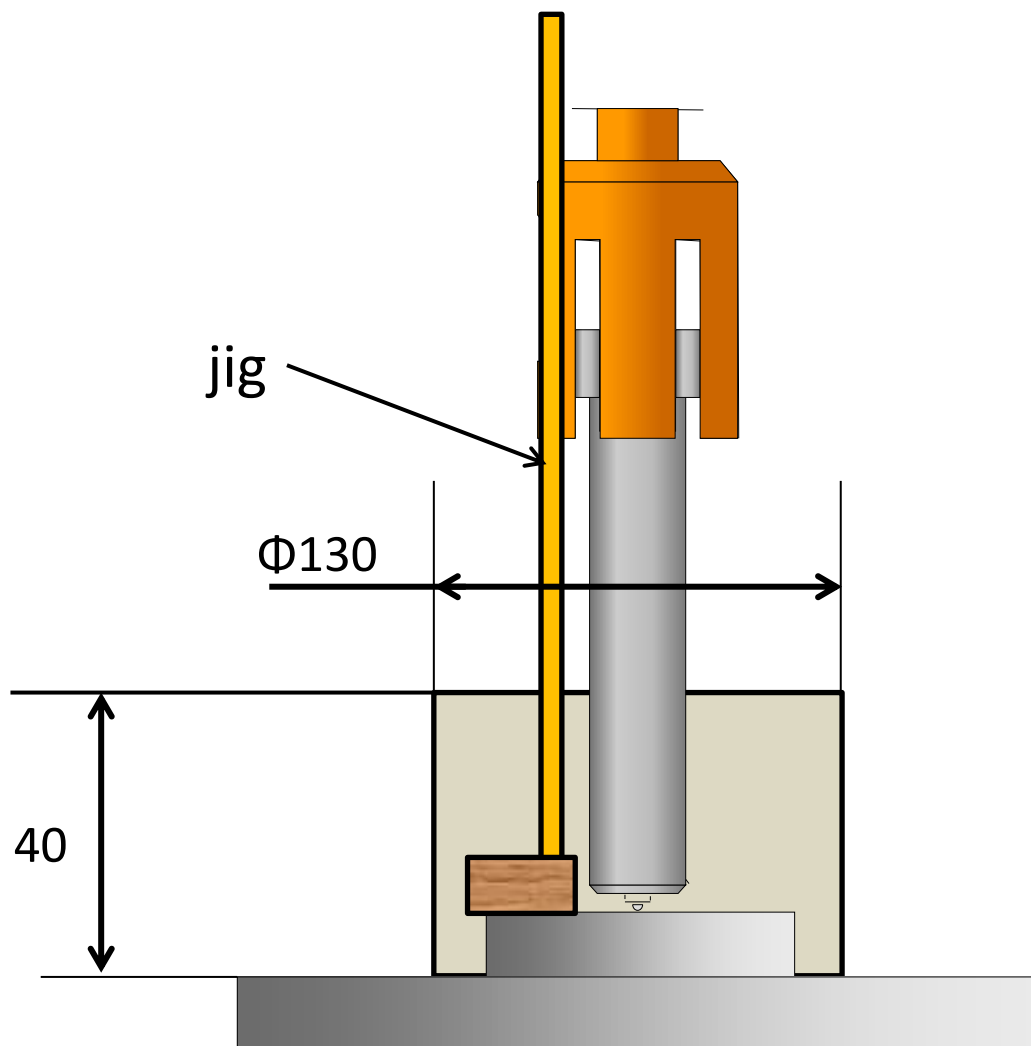


Fig.2—6 Jig for welding without ferrule

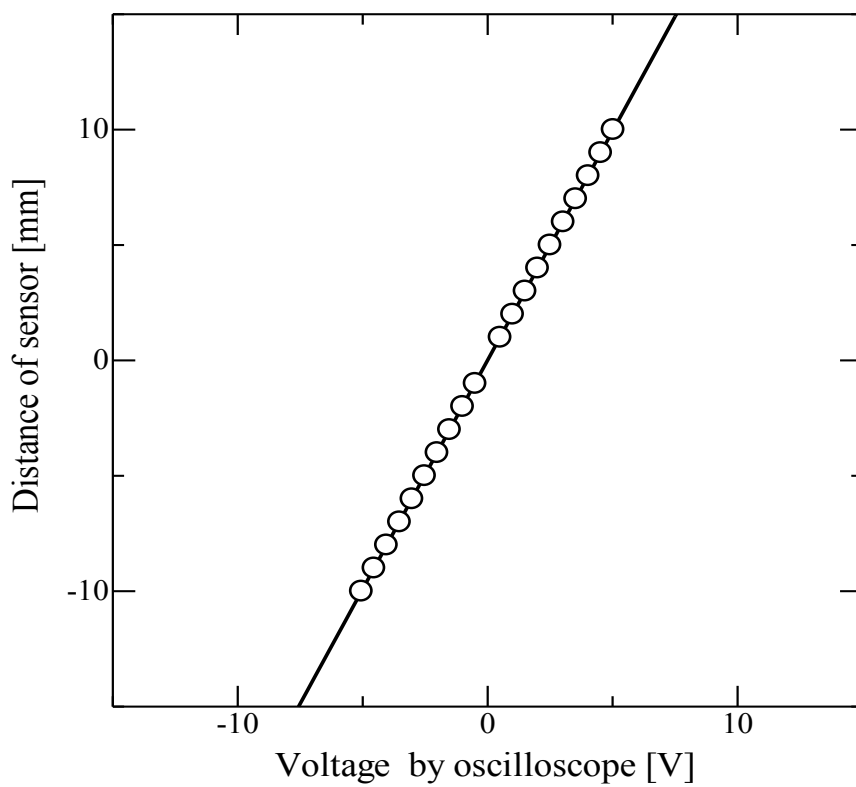


Fig.2—7 Relationship between voltage of laser sensor and actual distance

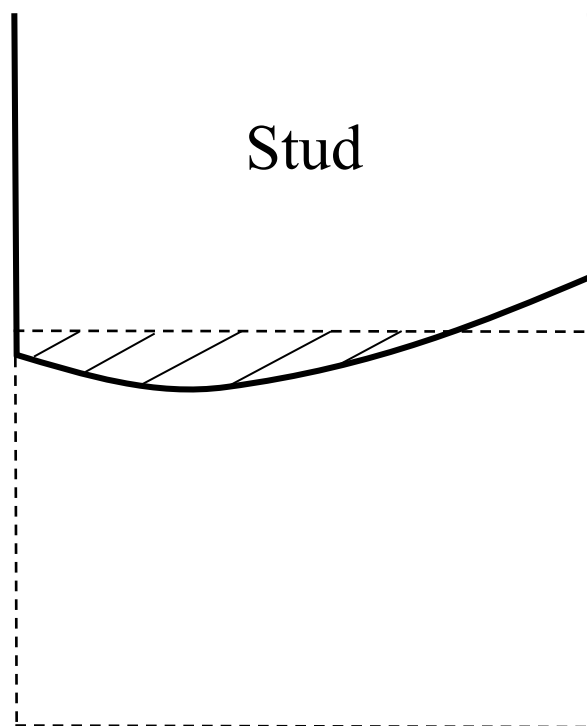


Fig.2—8 Volume of molten metal (stud)

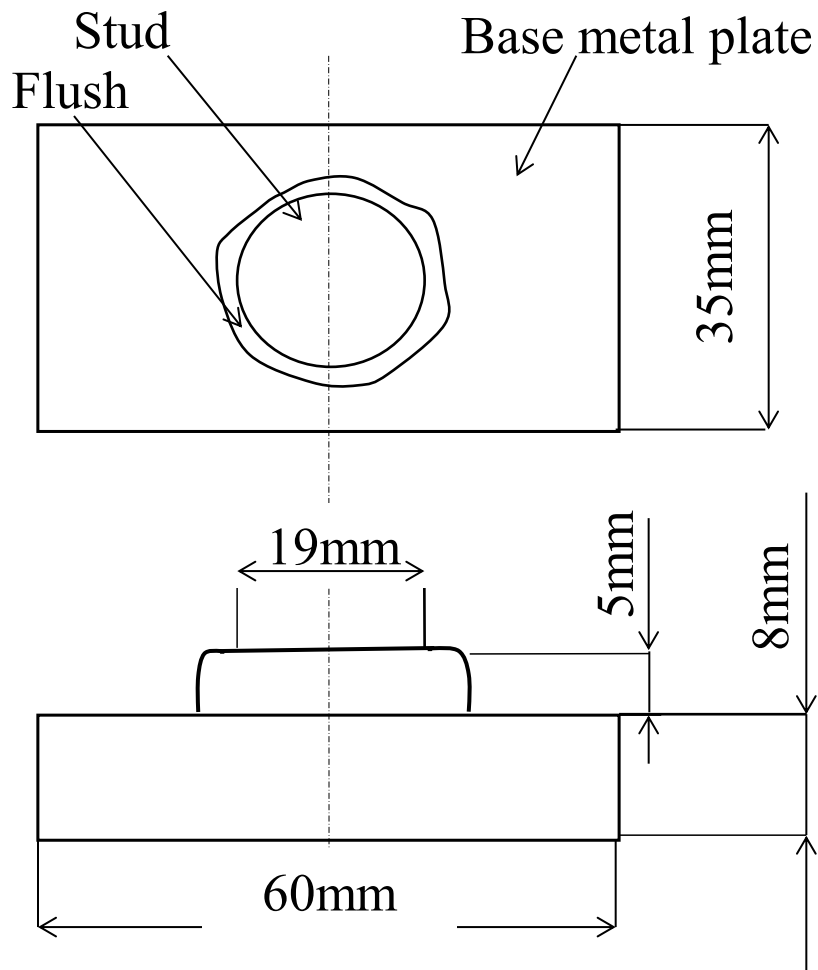
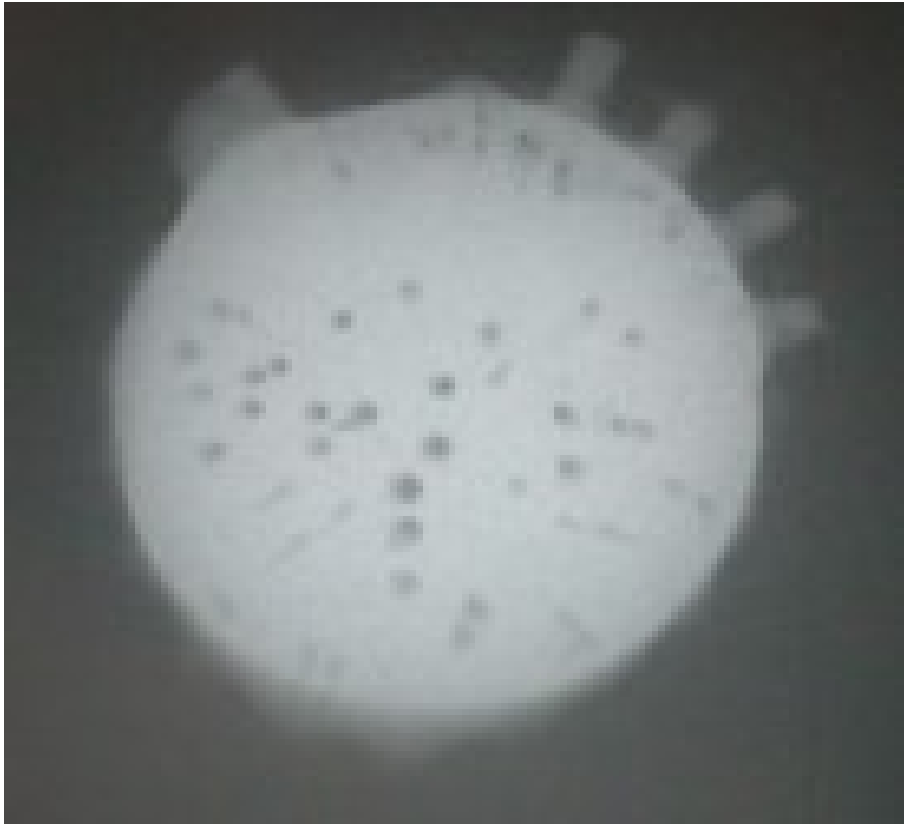


Fig.2—9 Dimensions of specimen for radiographic testing



10mm

Fig.2—10 Example of radiographic testing photo

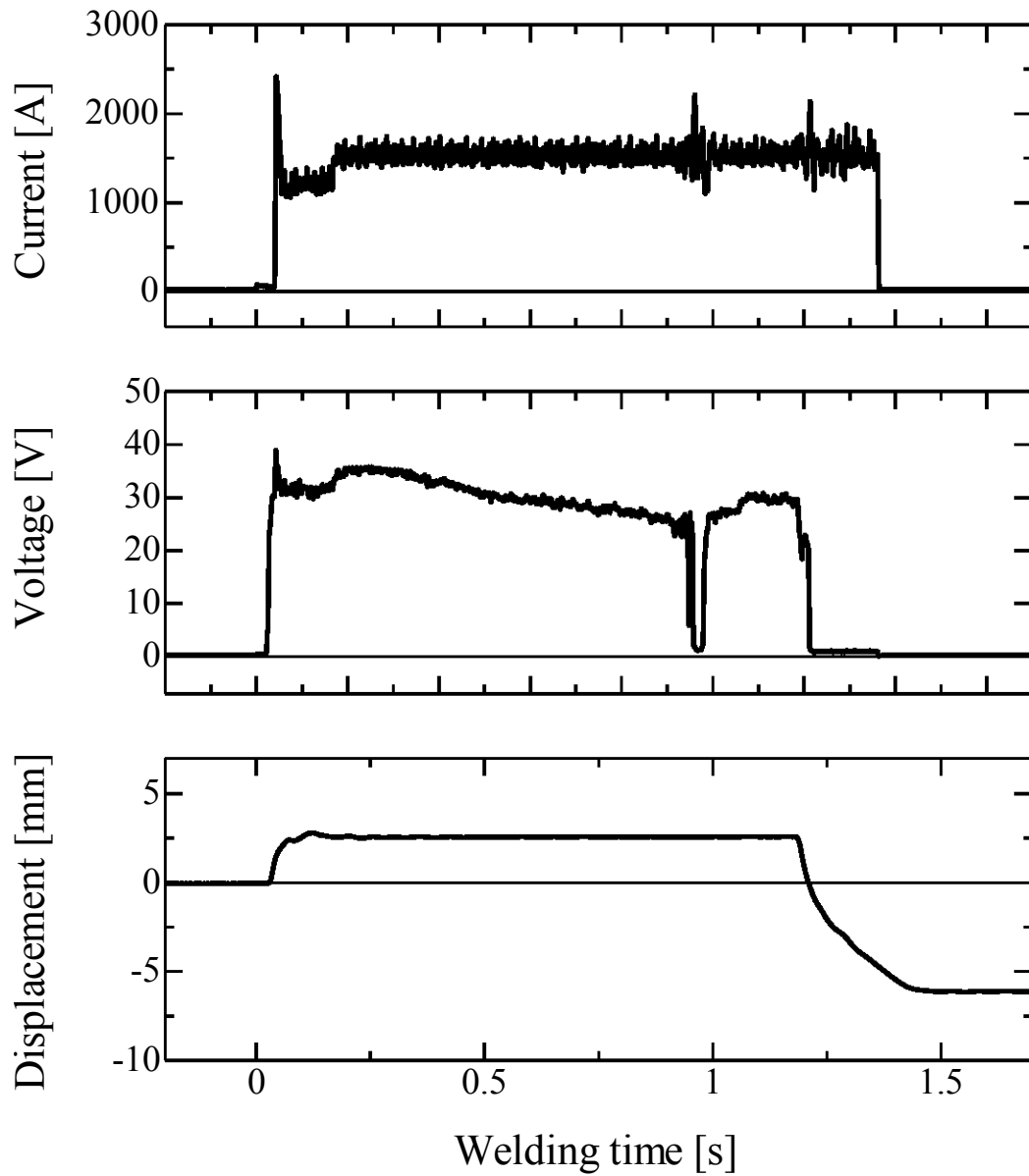


Fig.3 — 1 Electric phenomenon and movement of stud during stud welding

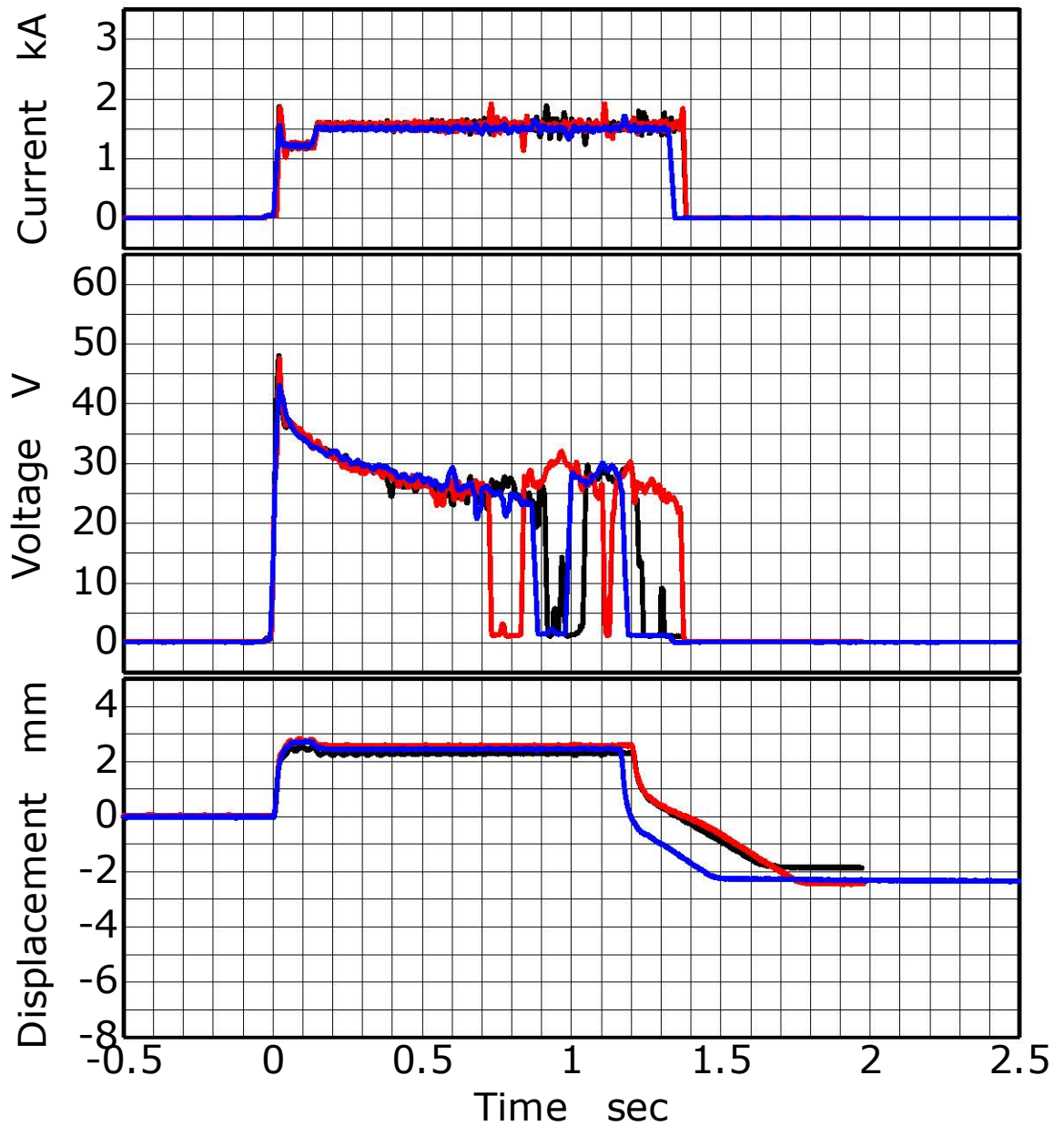


Fig.3 —2 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, Low, with feruule)

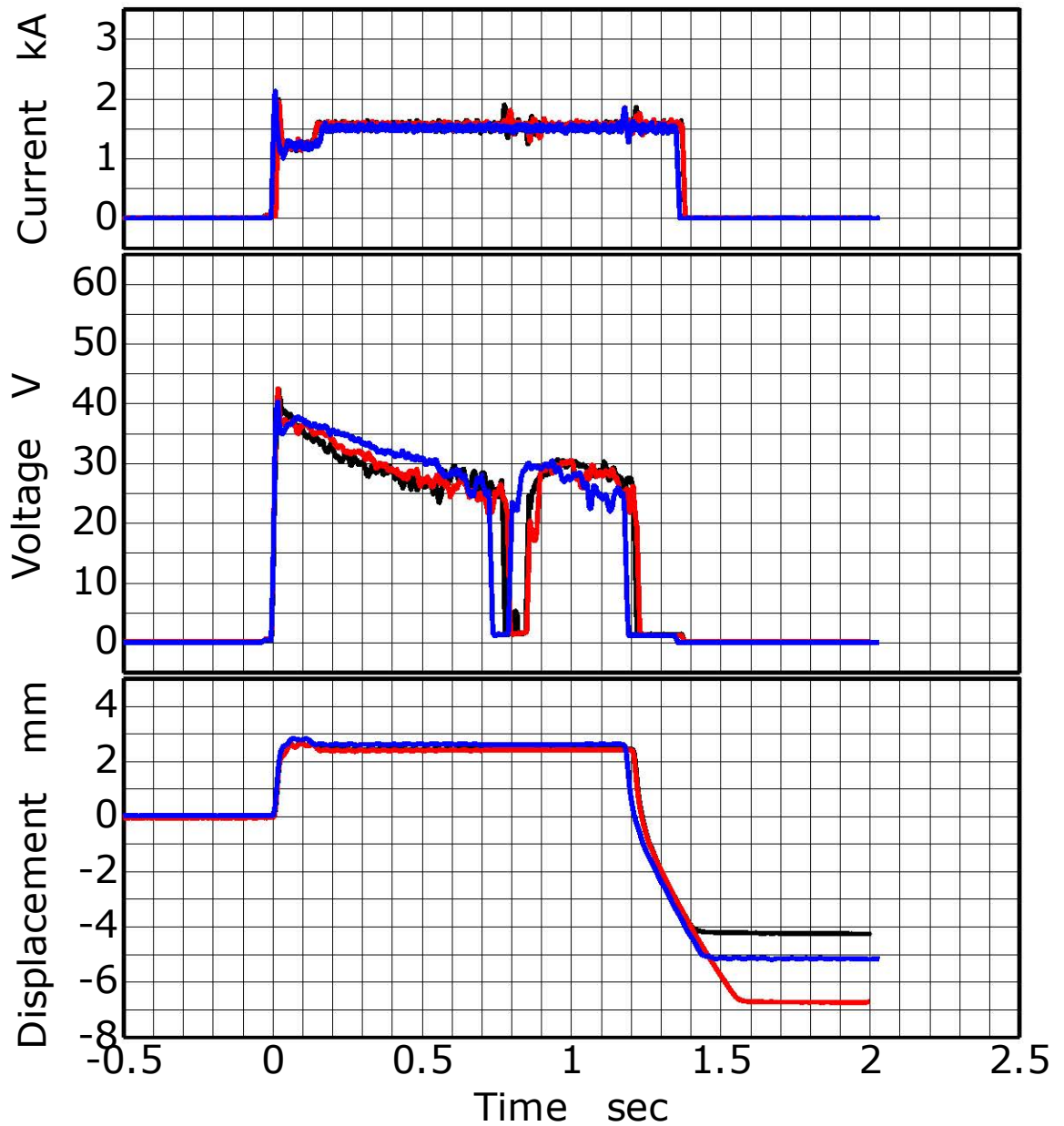


Fig.3 —3 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, Medium, with feruule)

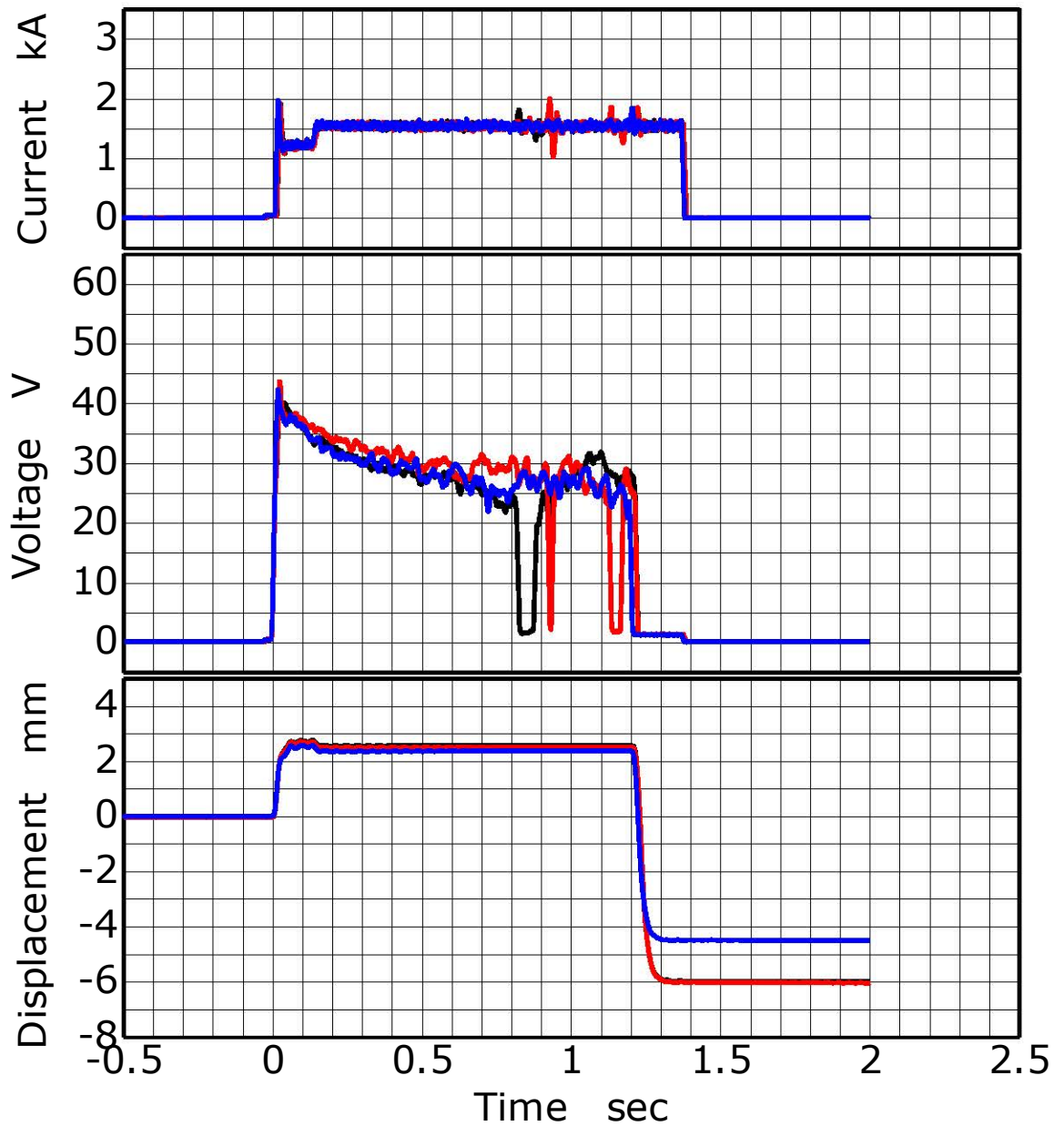


Fig.3 —4 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, High, with feruule)

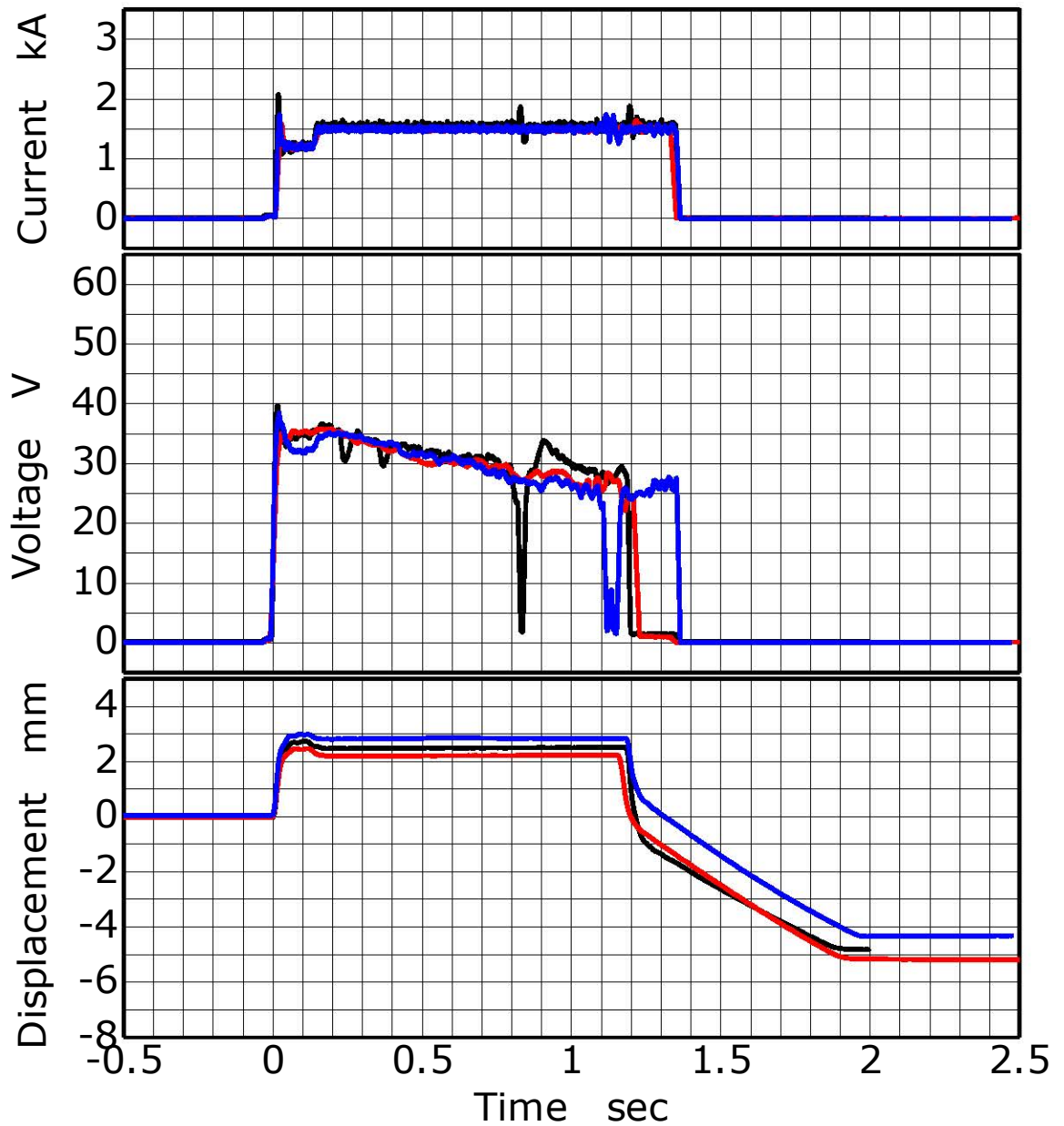


Fig.3 —5 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, Low, with feruule)

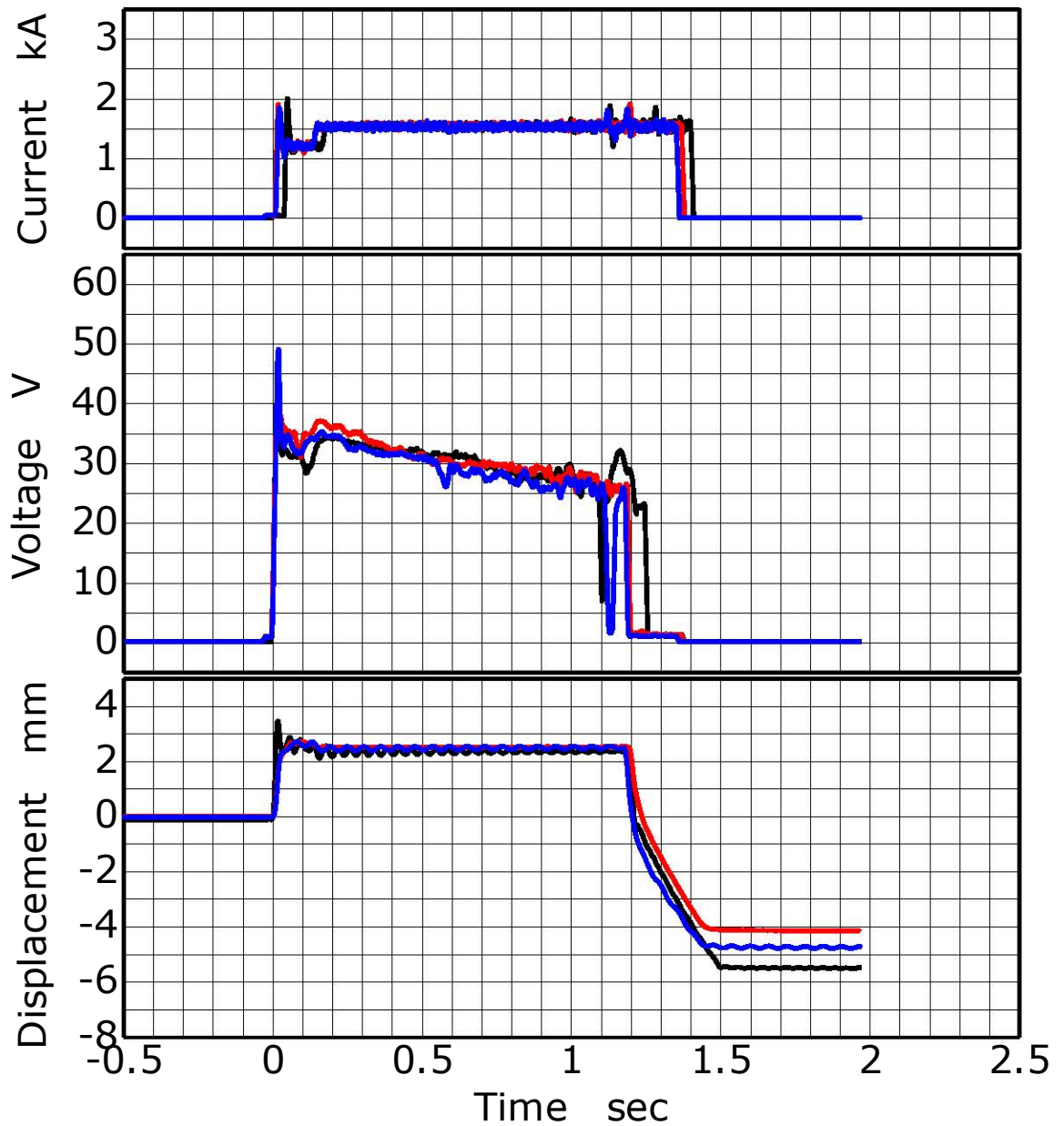


Fig.3 —6 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, Medium, with feruule)

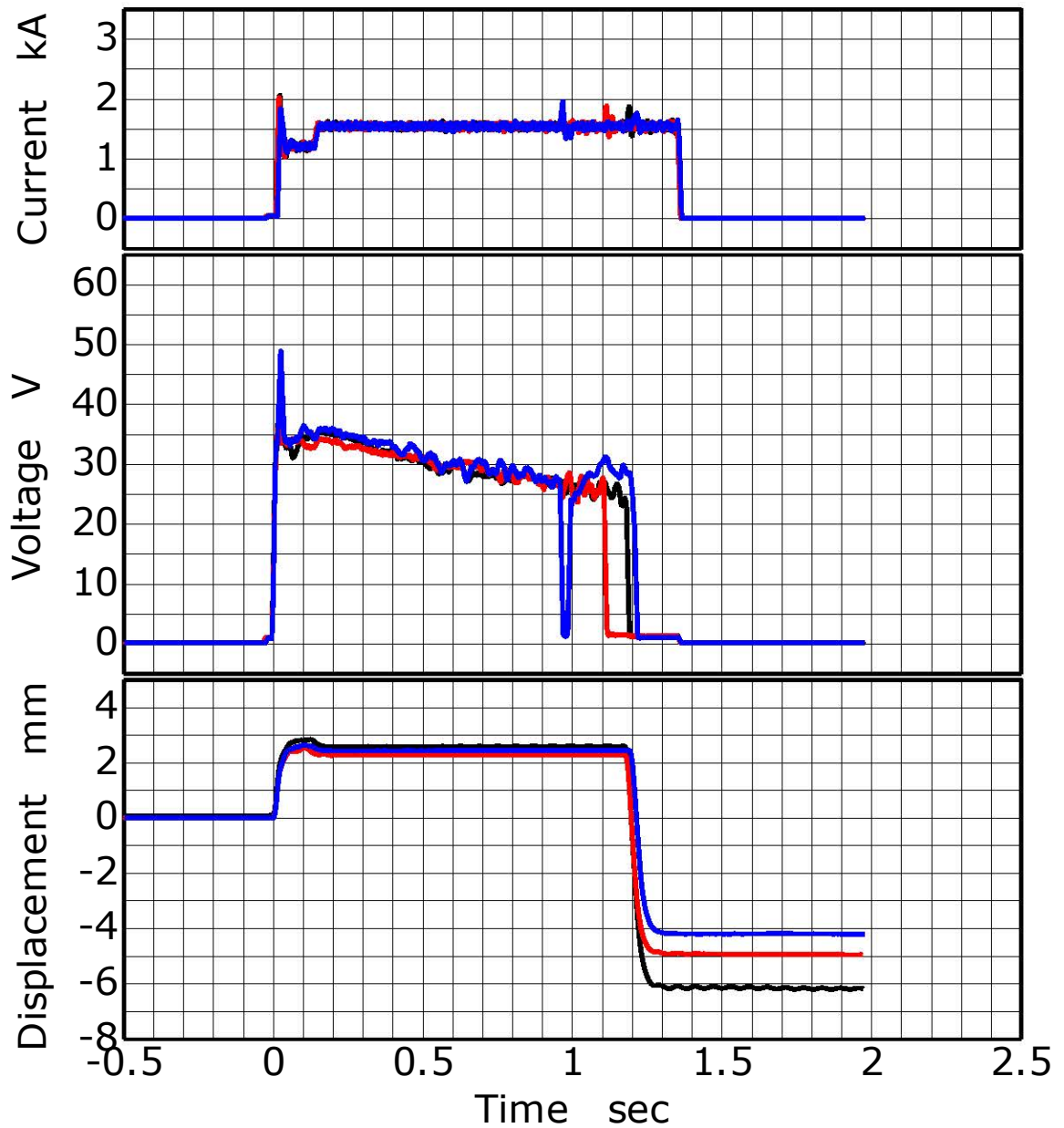


Fig.3 —7 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, High, with feruule)

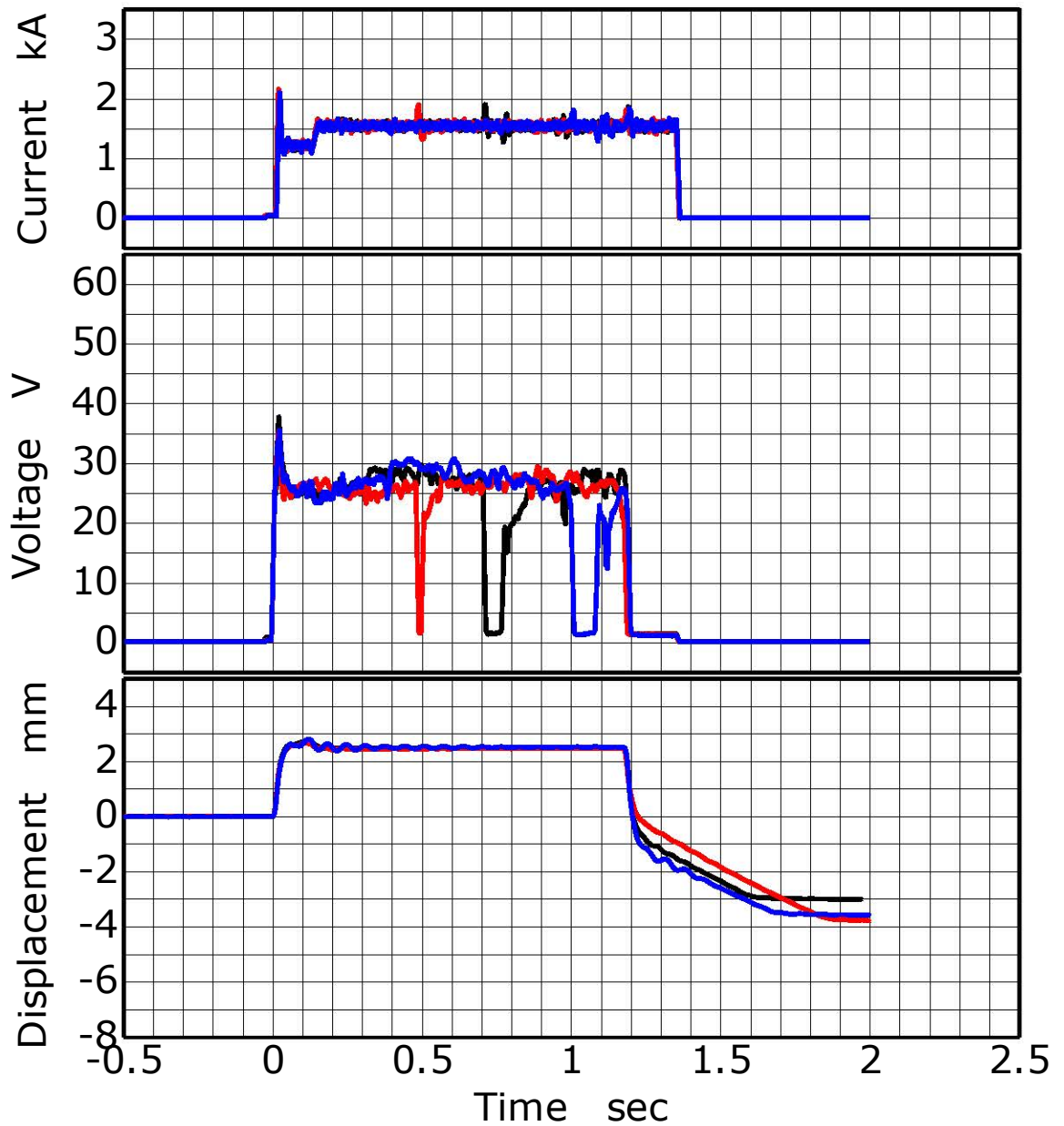


Fig.3 —8 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, Low, with feruule)

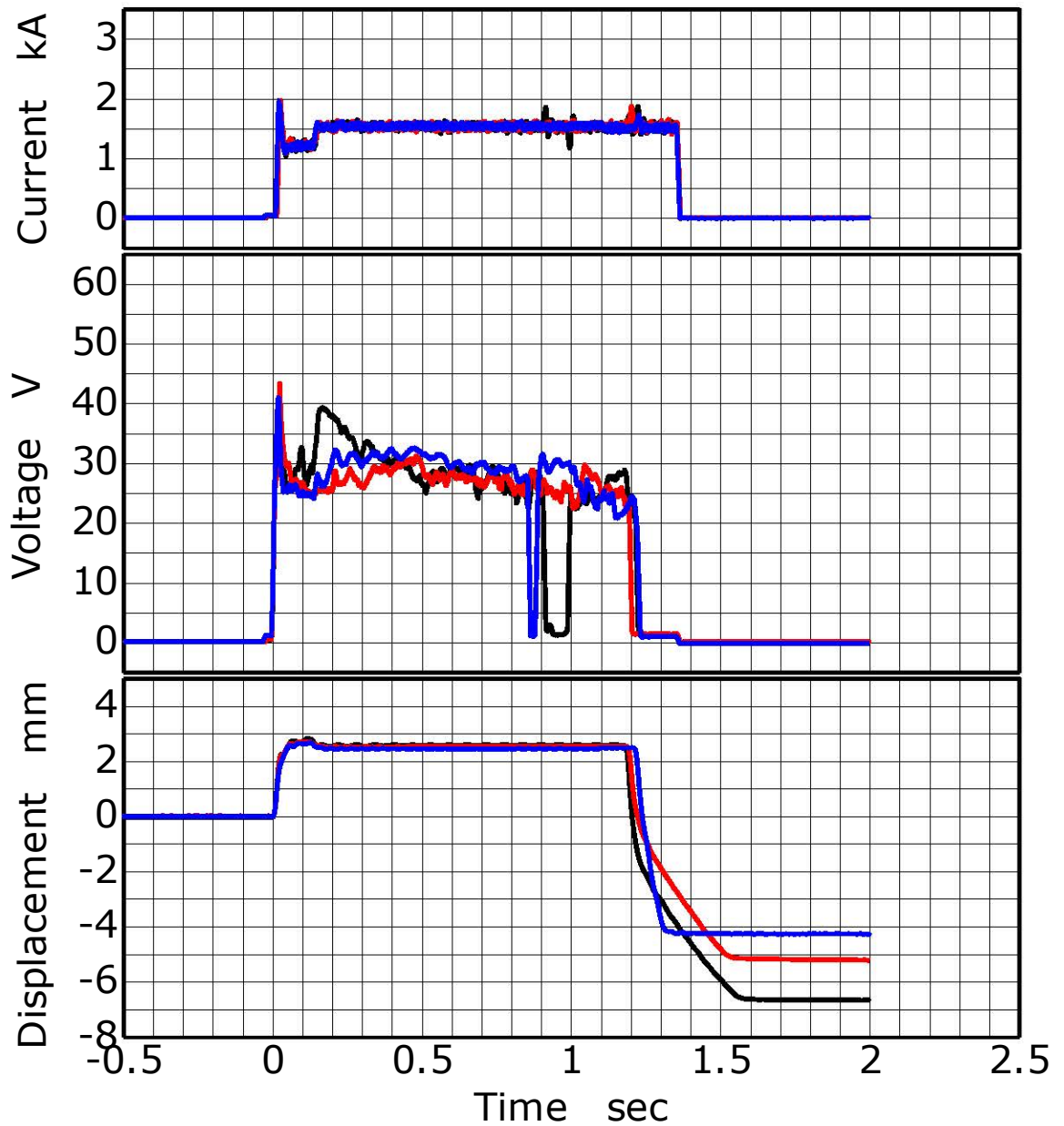


Fig.3 —9 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, Medium, with feruule)

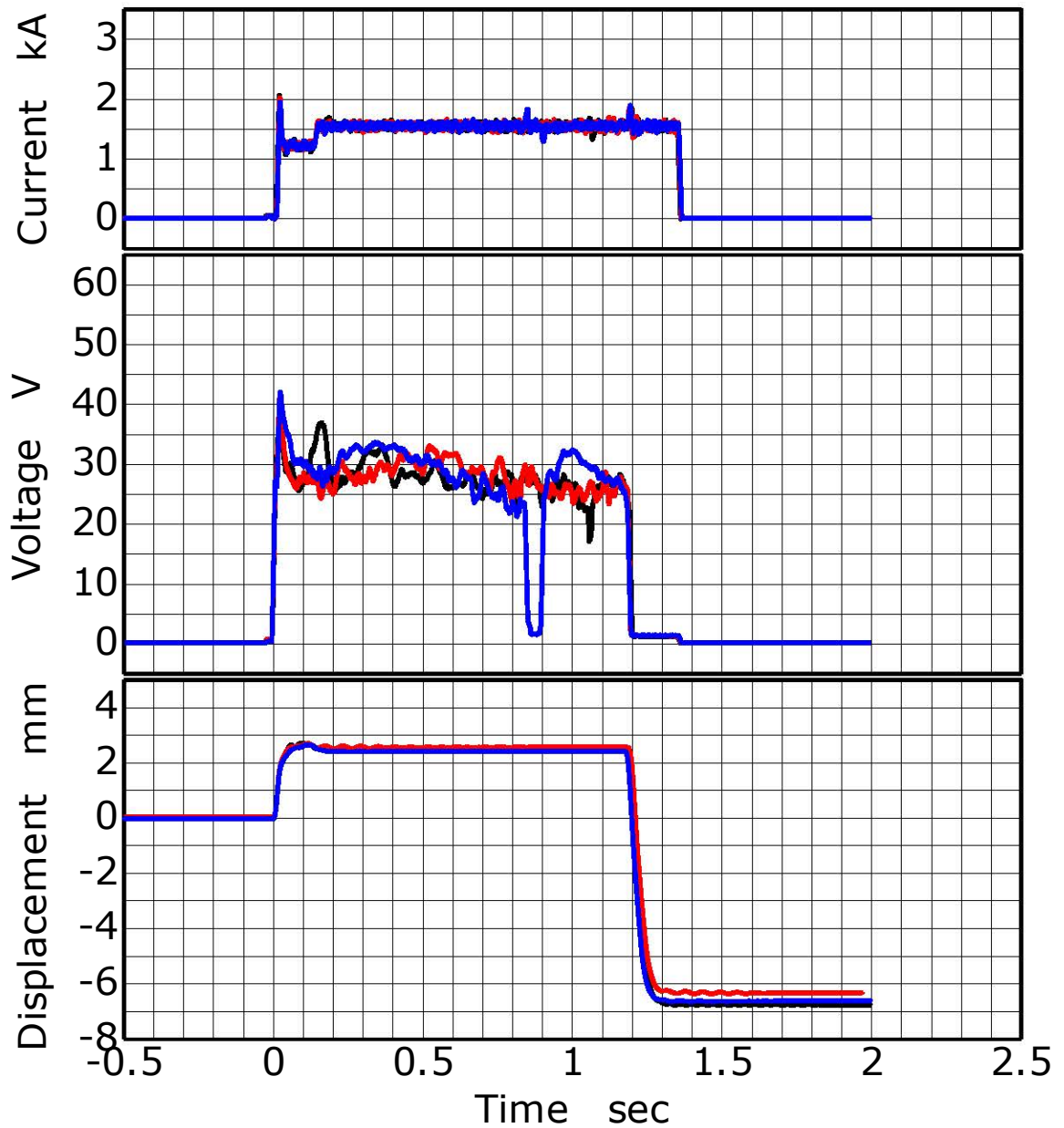


Fig.3 — 10 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, High, with feruule)

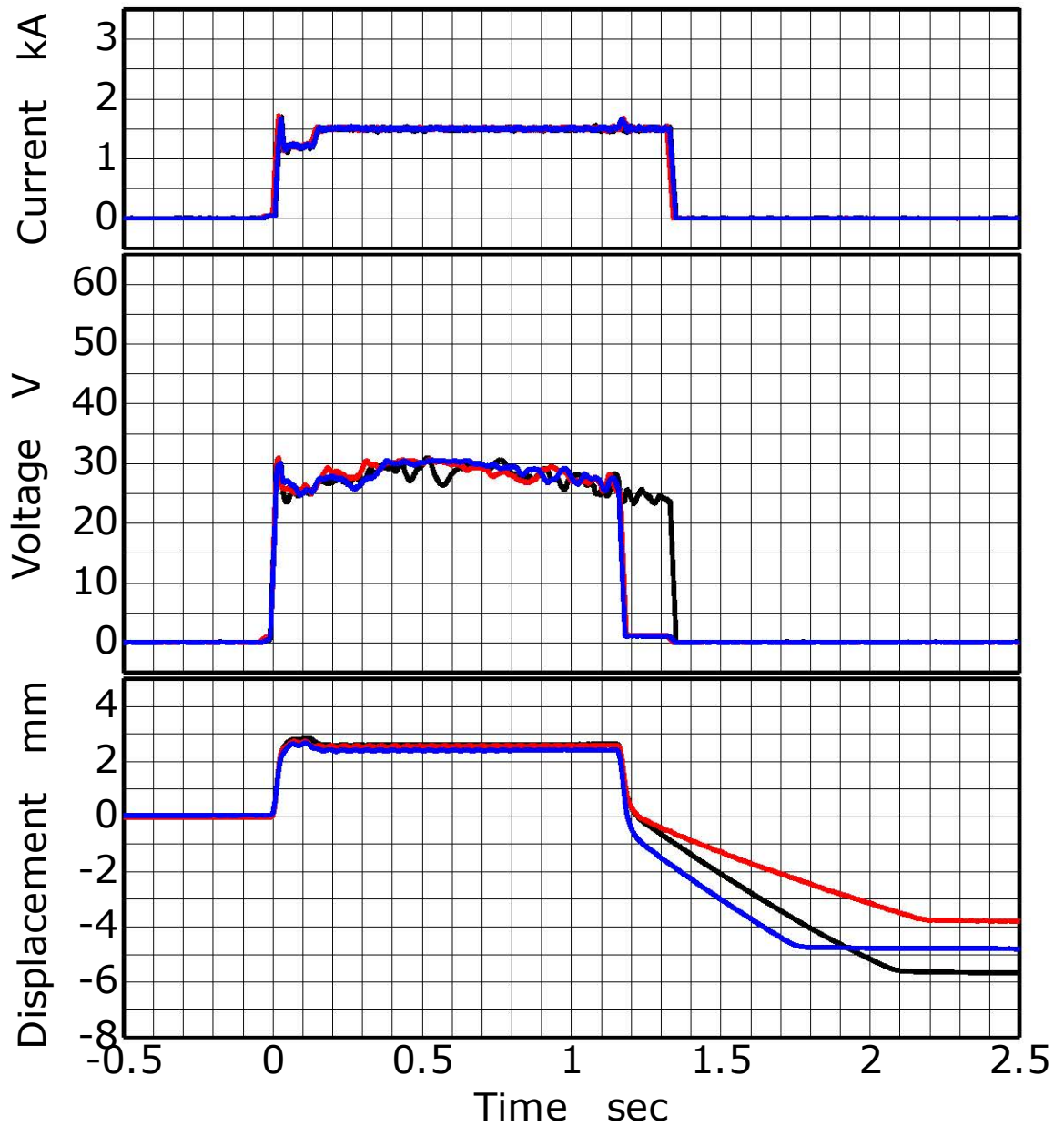


Fig.3 — 11 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, Low, with feruule)

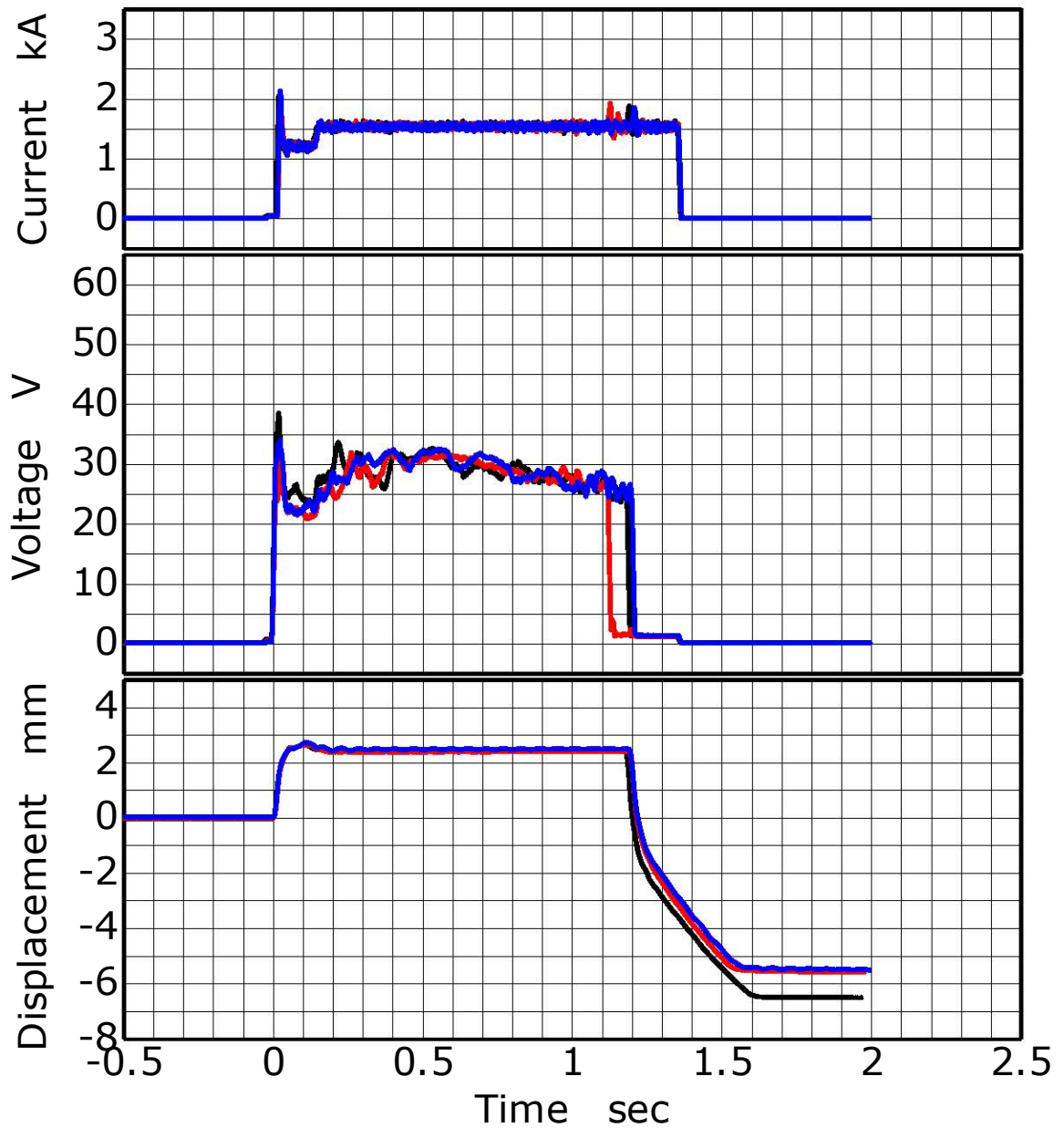


Fig.3 — 12 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, Medium, with feruule)

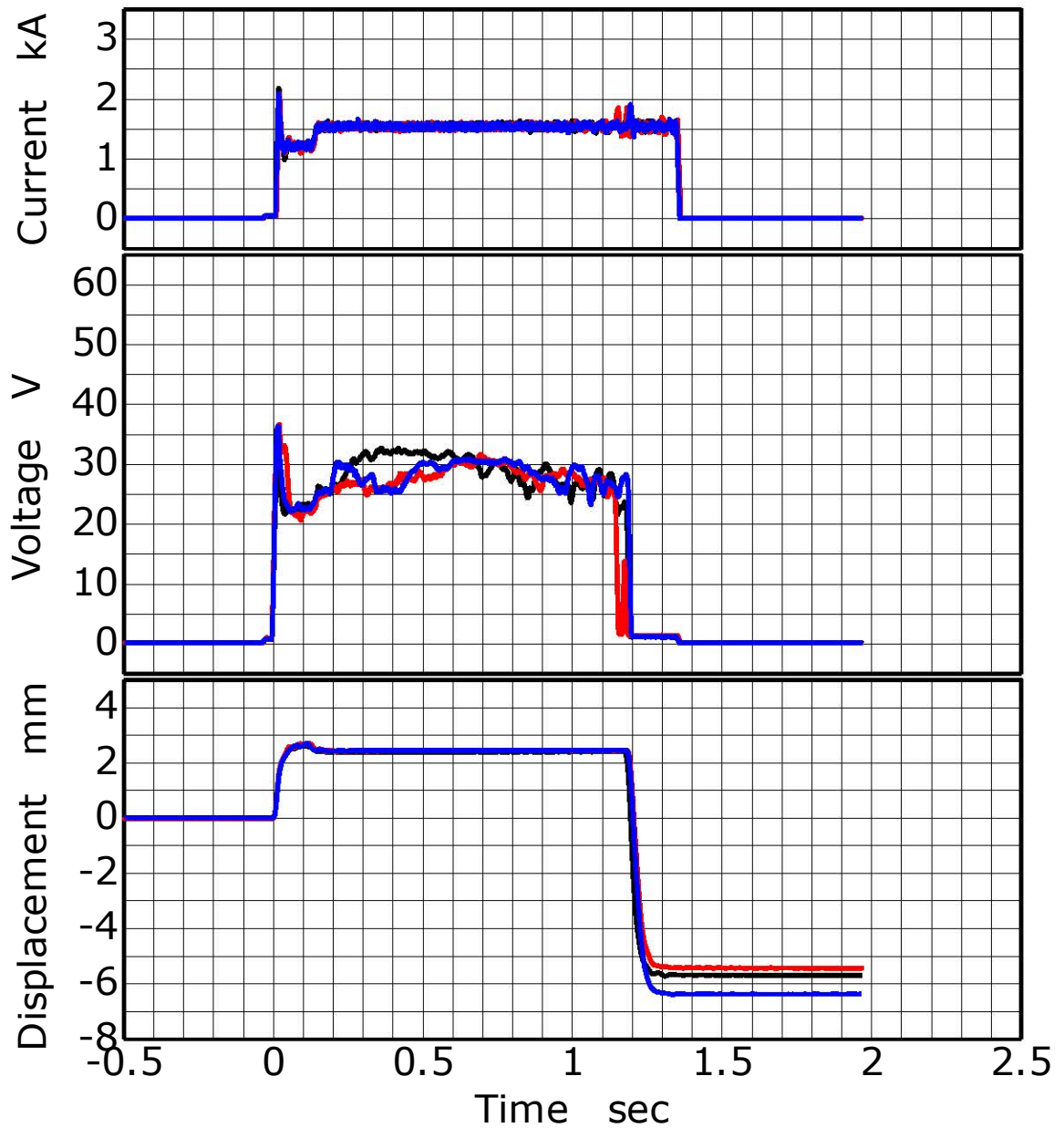


Fig.3 — 13 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, High, with feruule)

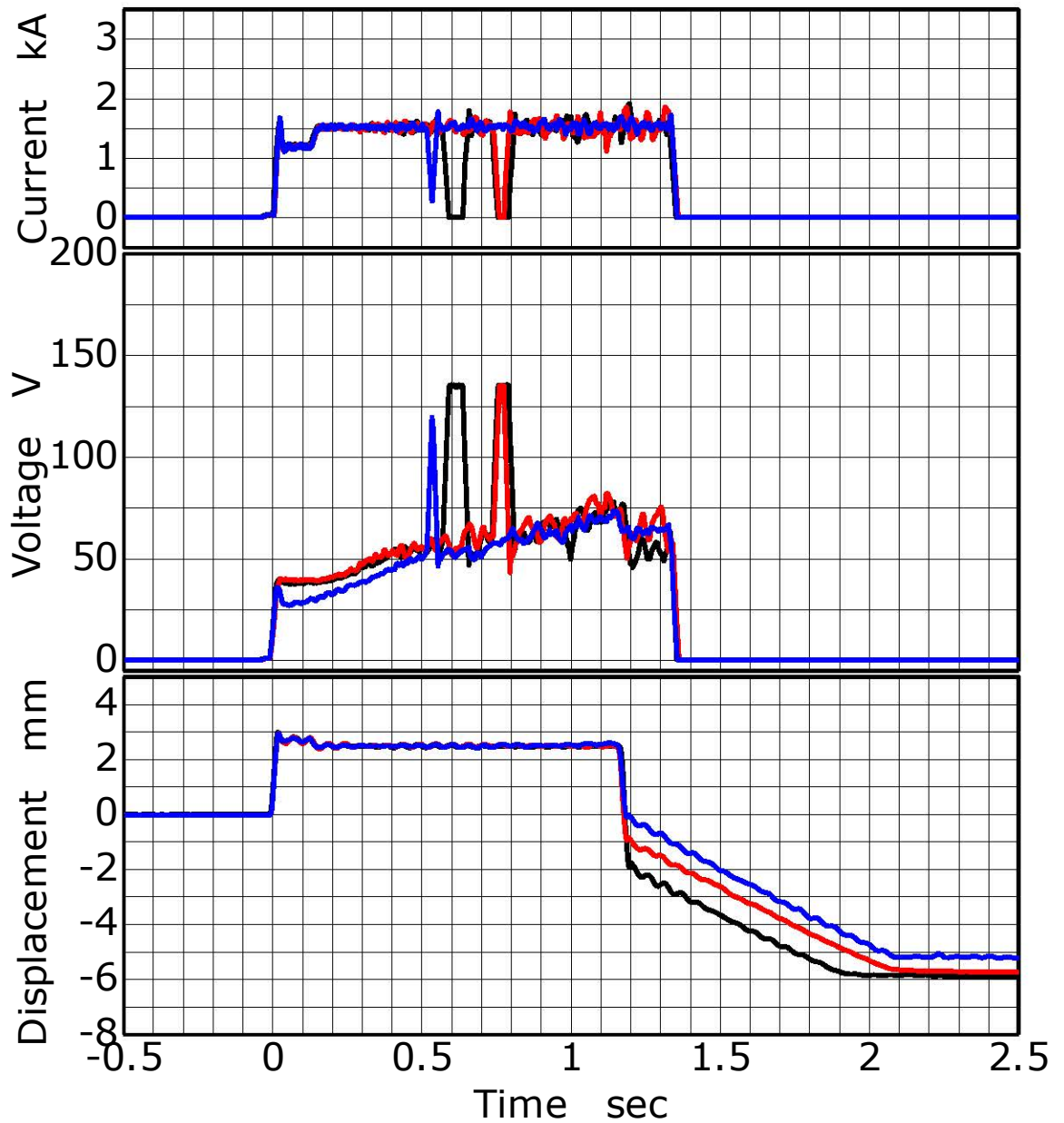


Fig.3 — 14 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, Low, without feruule)

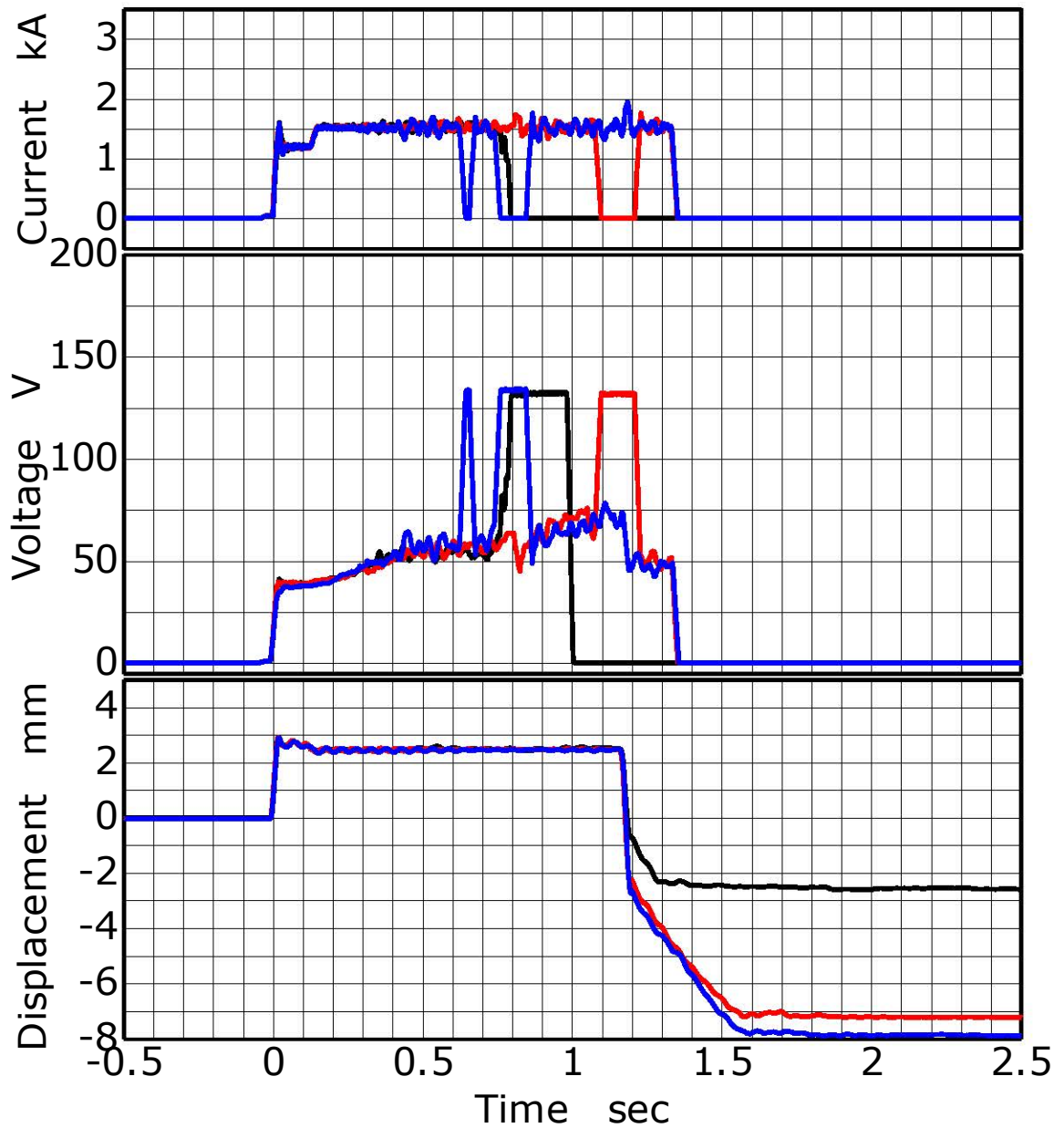


Fig.3 — 15 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, Medium, without feruule)

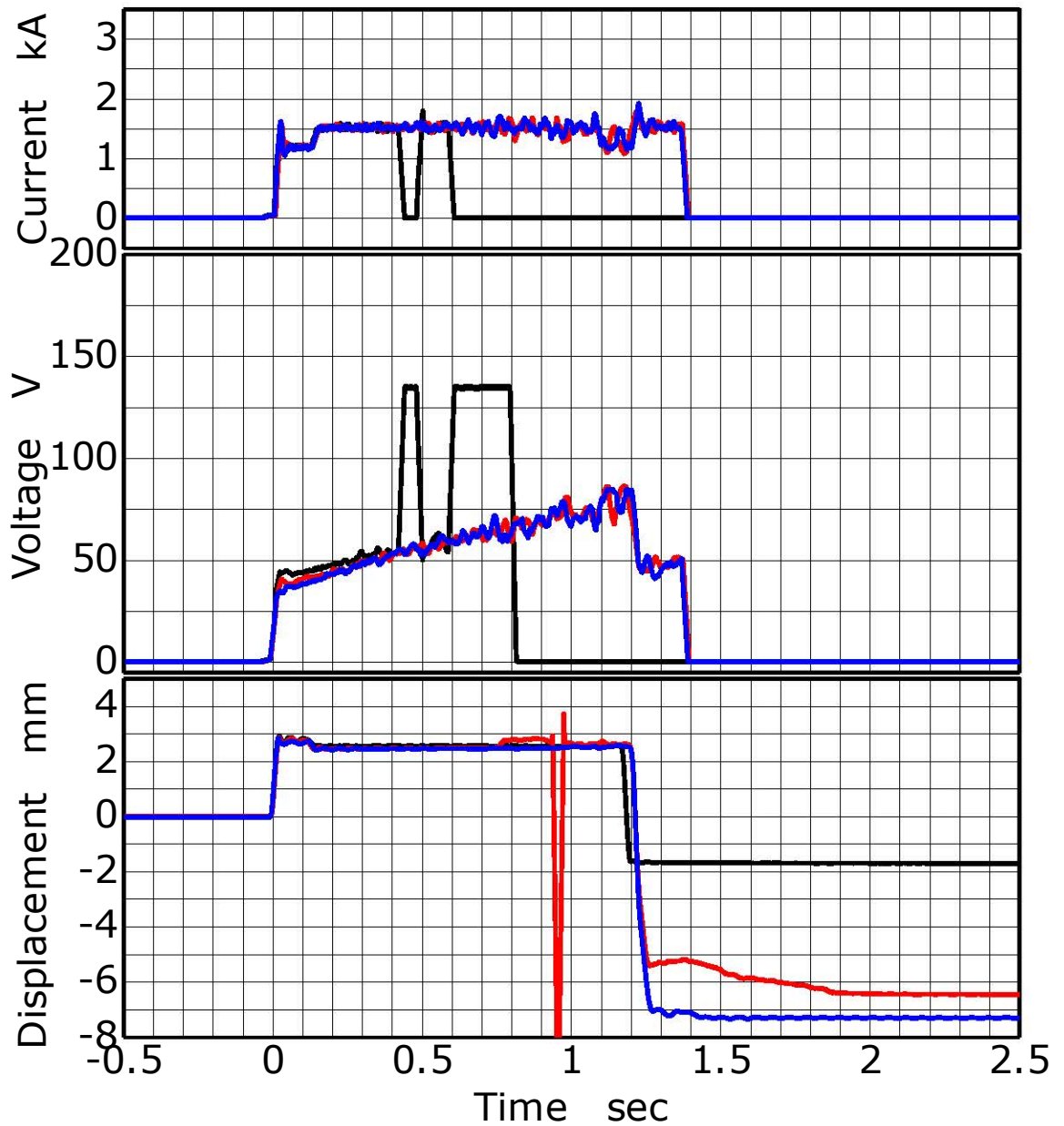


Fig.3 — 16 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Air, High, without feruule)

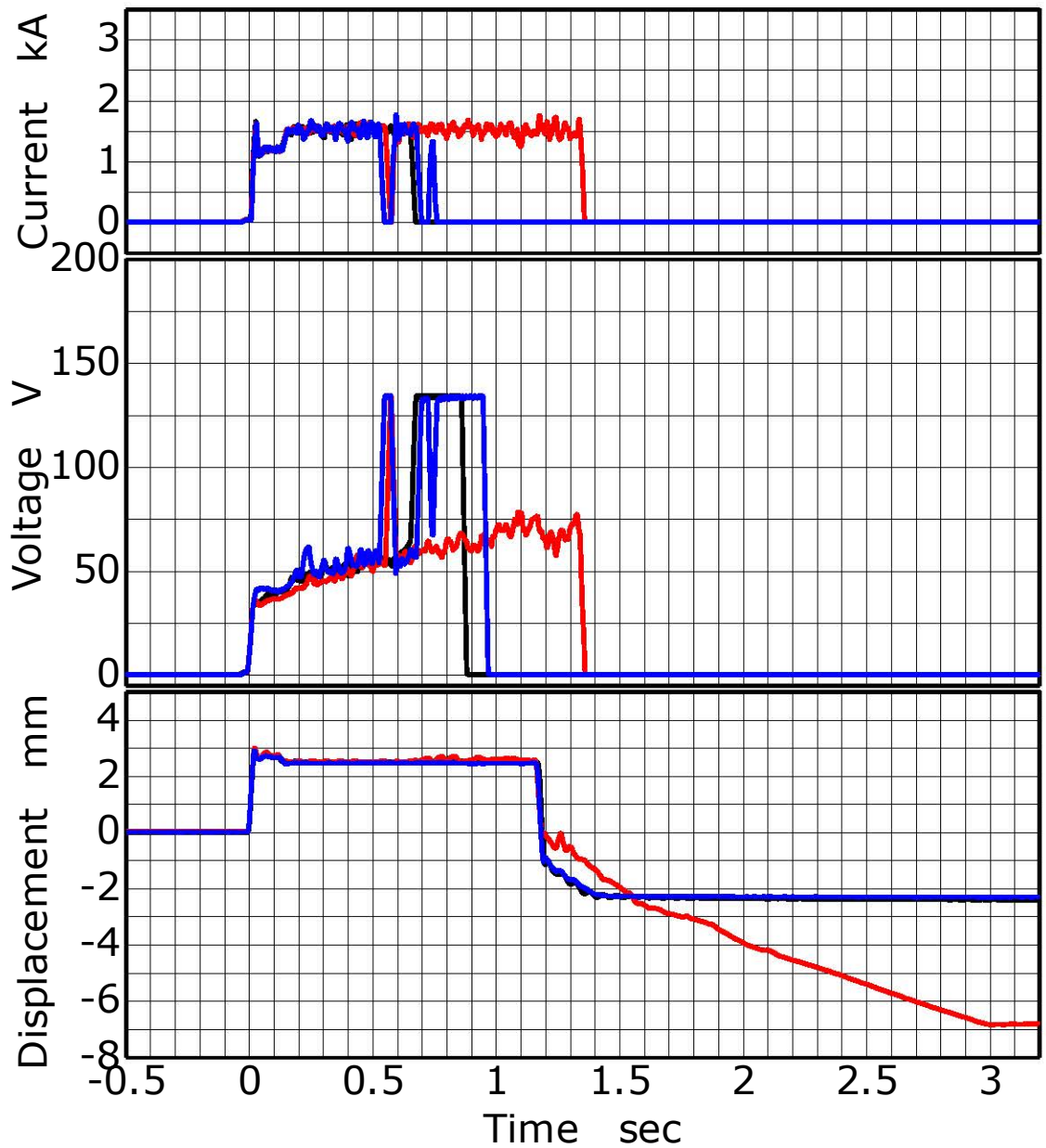


Fig.3 — 17 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, Low, without feruule)

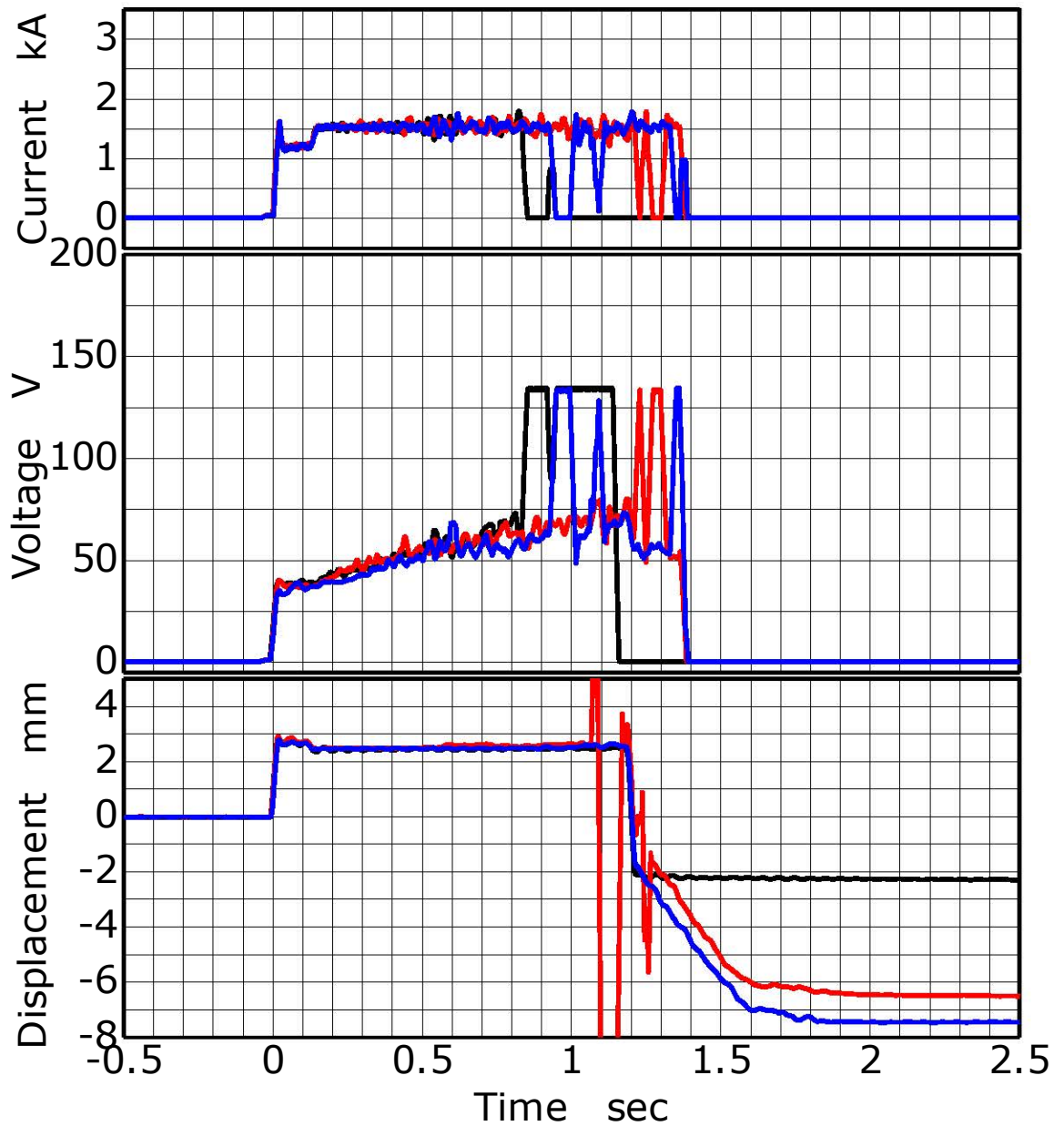


Fig.3 — 18 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, Medium, without feruule)

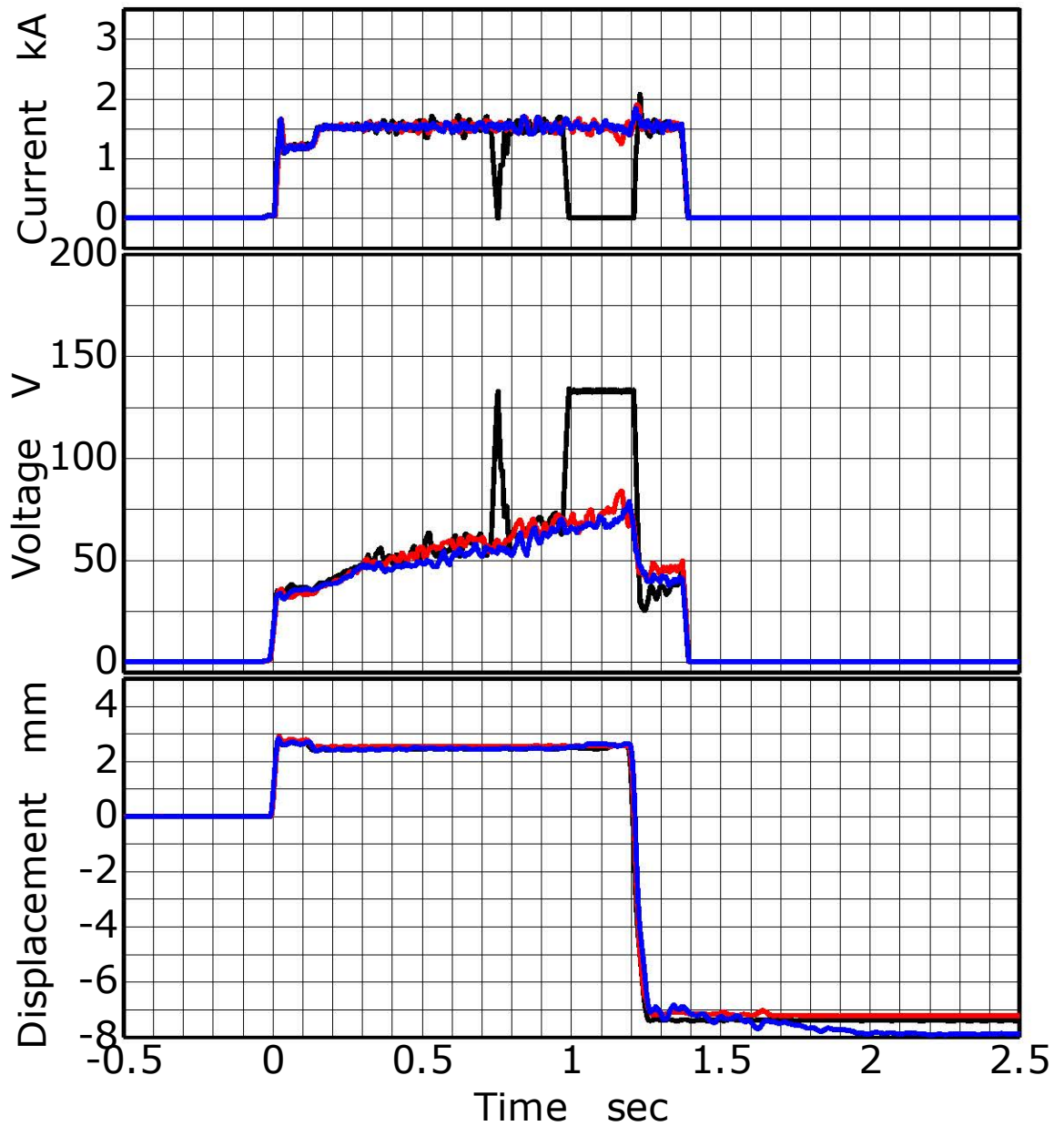


Fig.3 — 19 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Air, High, without feruule)

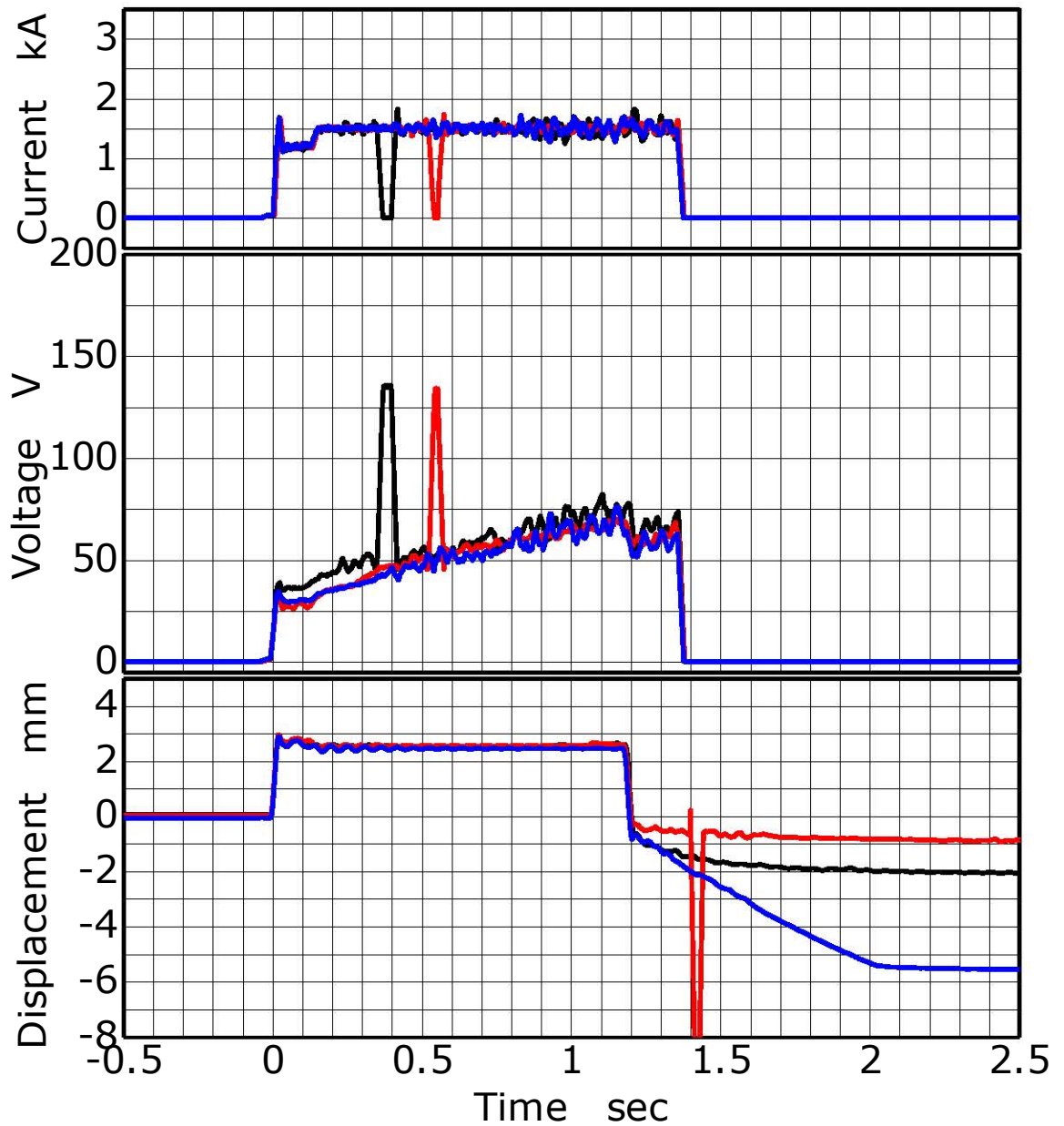


Fig.3 —20 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, Low, without feruule)

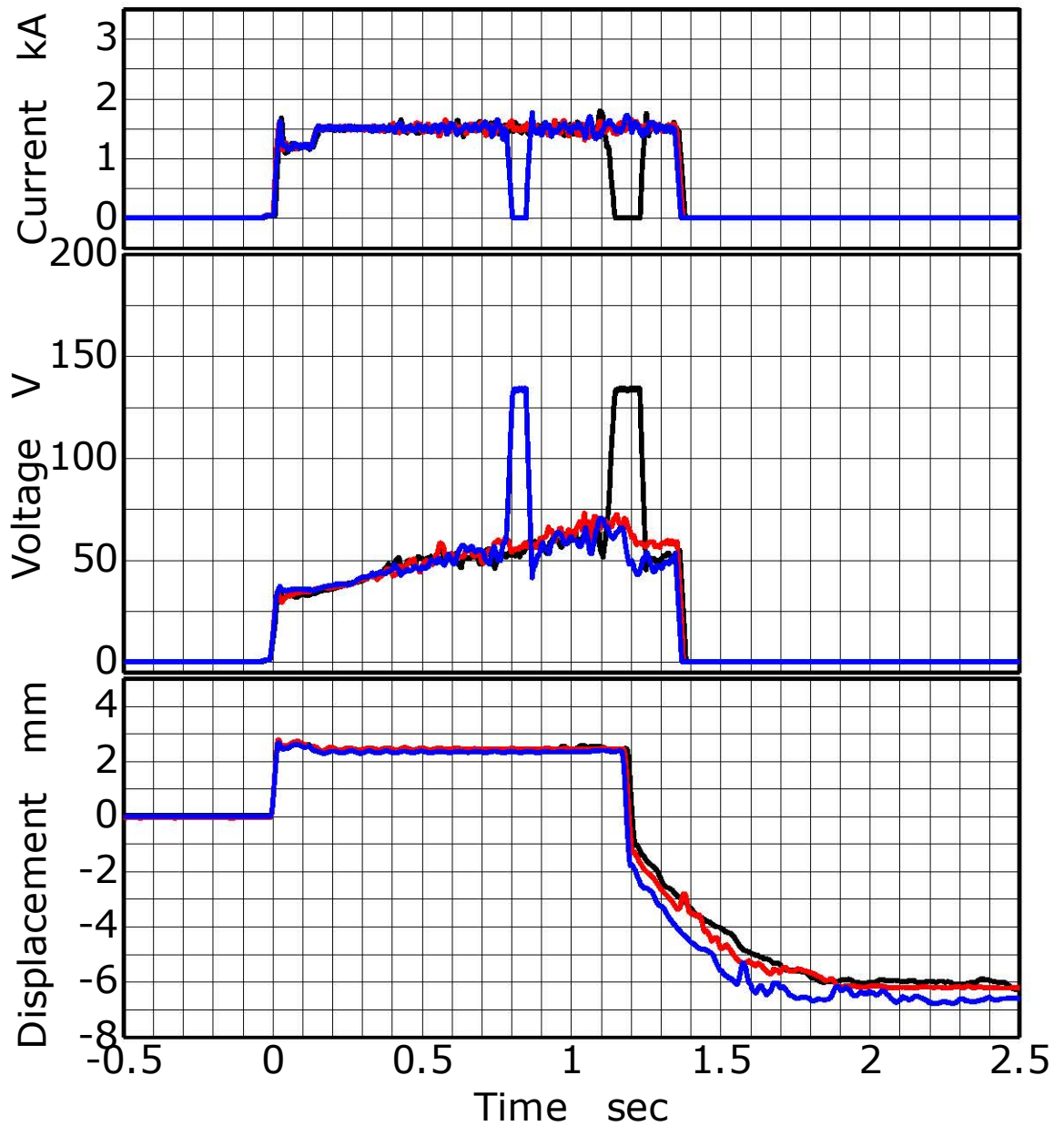


Fig.3 —21 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, Medium, without feruule)

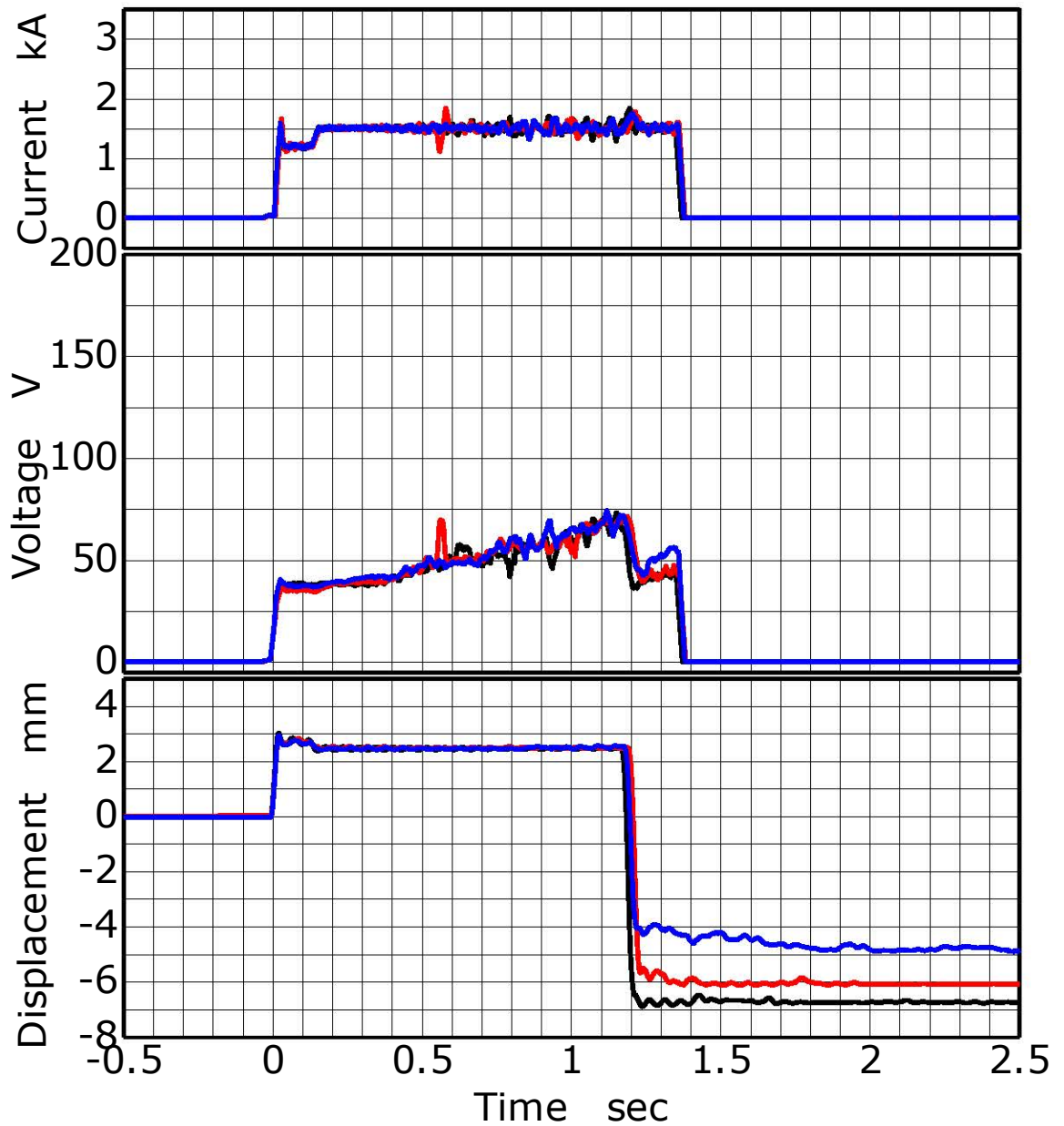


Fig.3 —22 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Fe, Ar, High, without feruule)

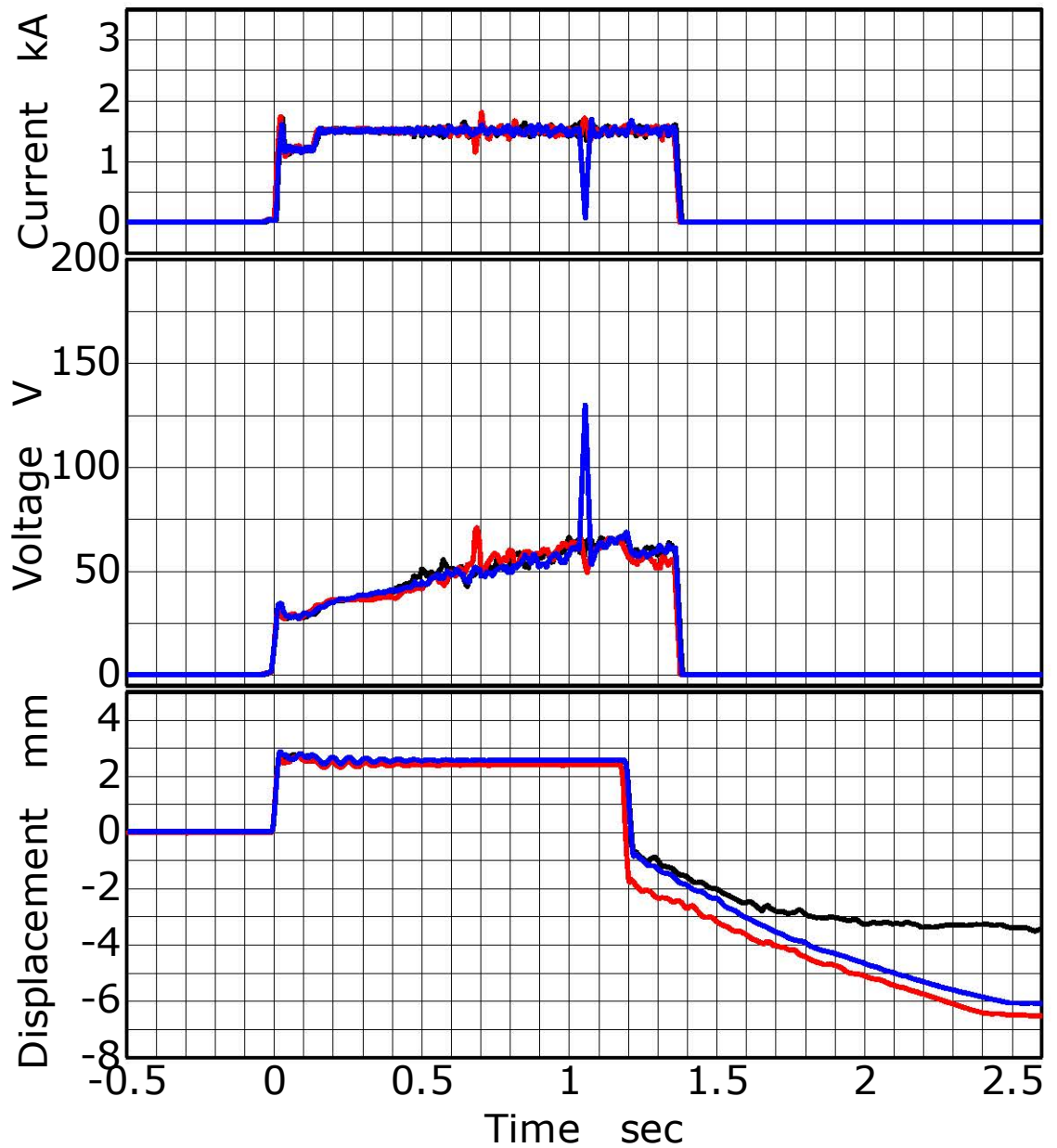


Fig.3 —23 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, Low, without feruule)

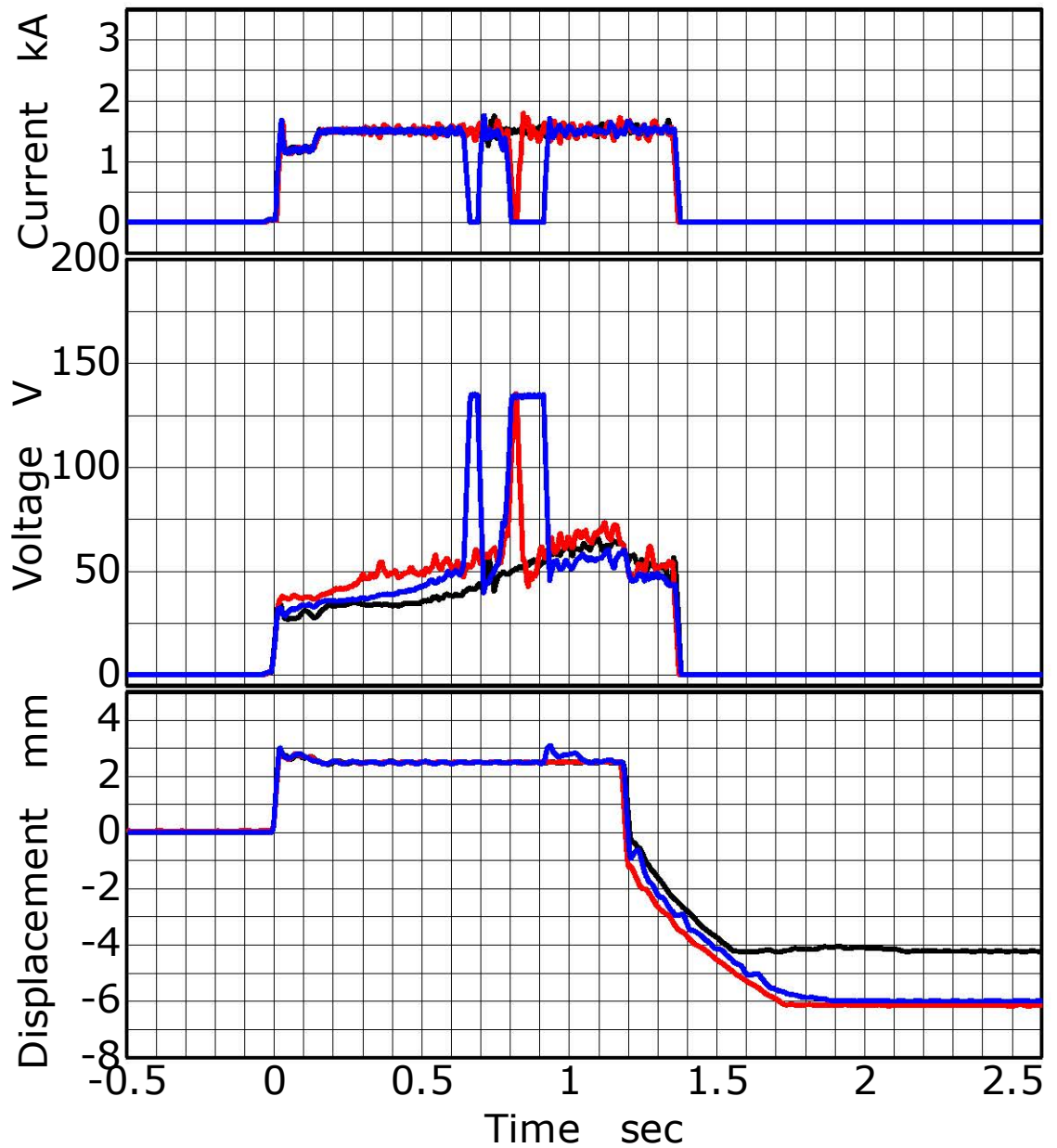


Fig.3 — 24 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, Medium, without feruule)

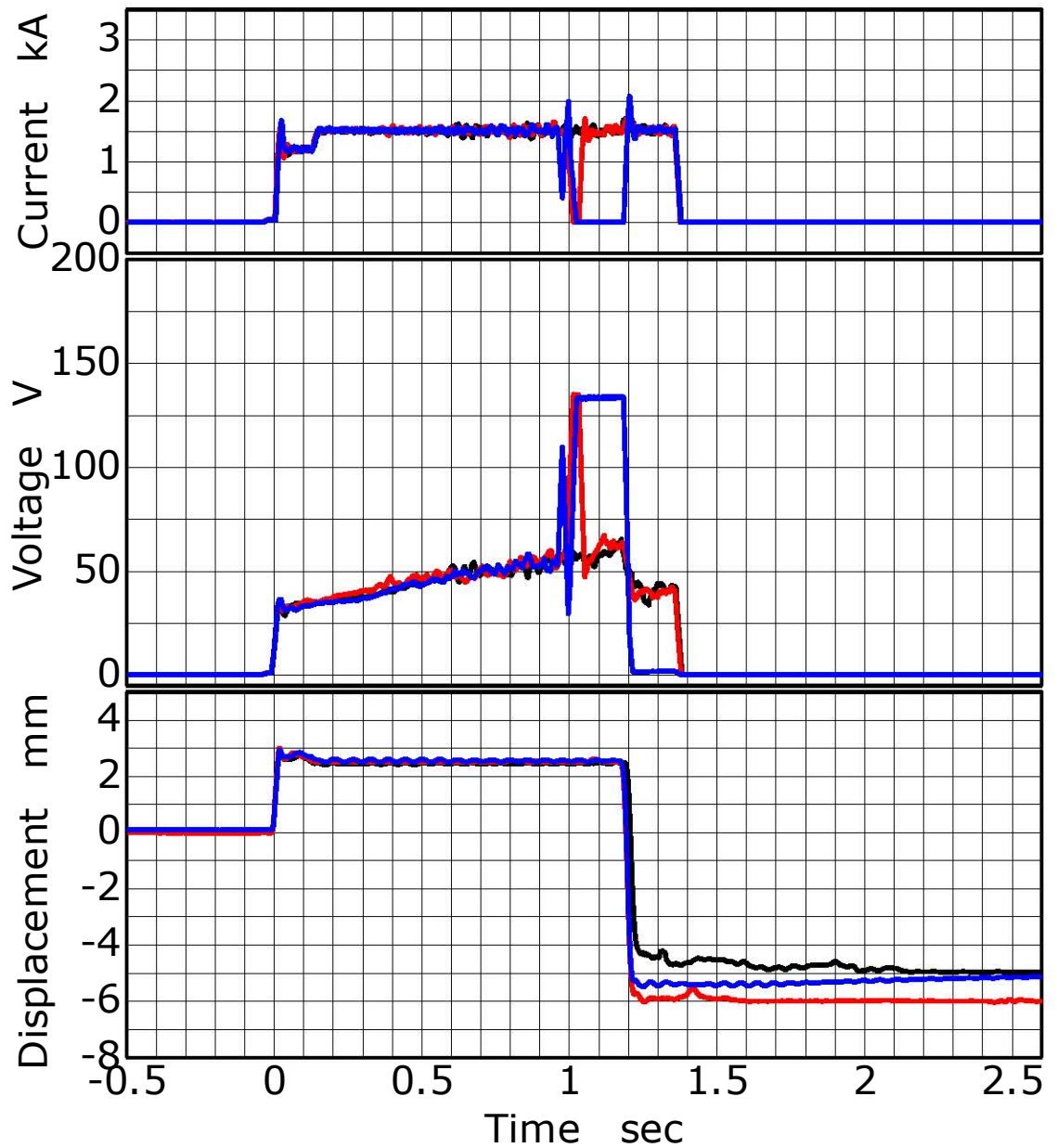


Fig.3 —25 Current and voltage and displacement of stud during stud welding(Al, Ar, High, without feruule)

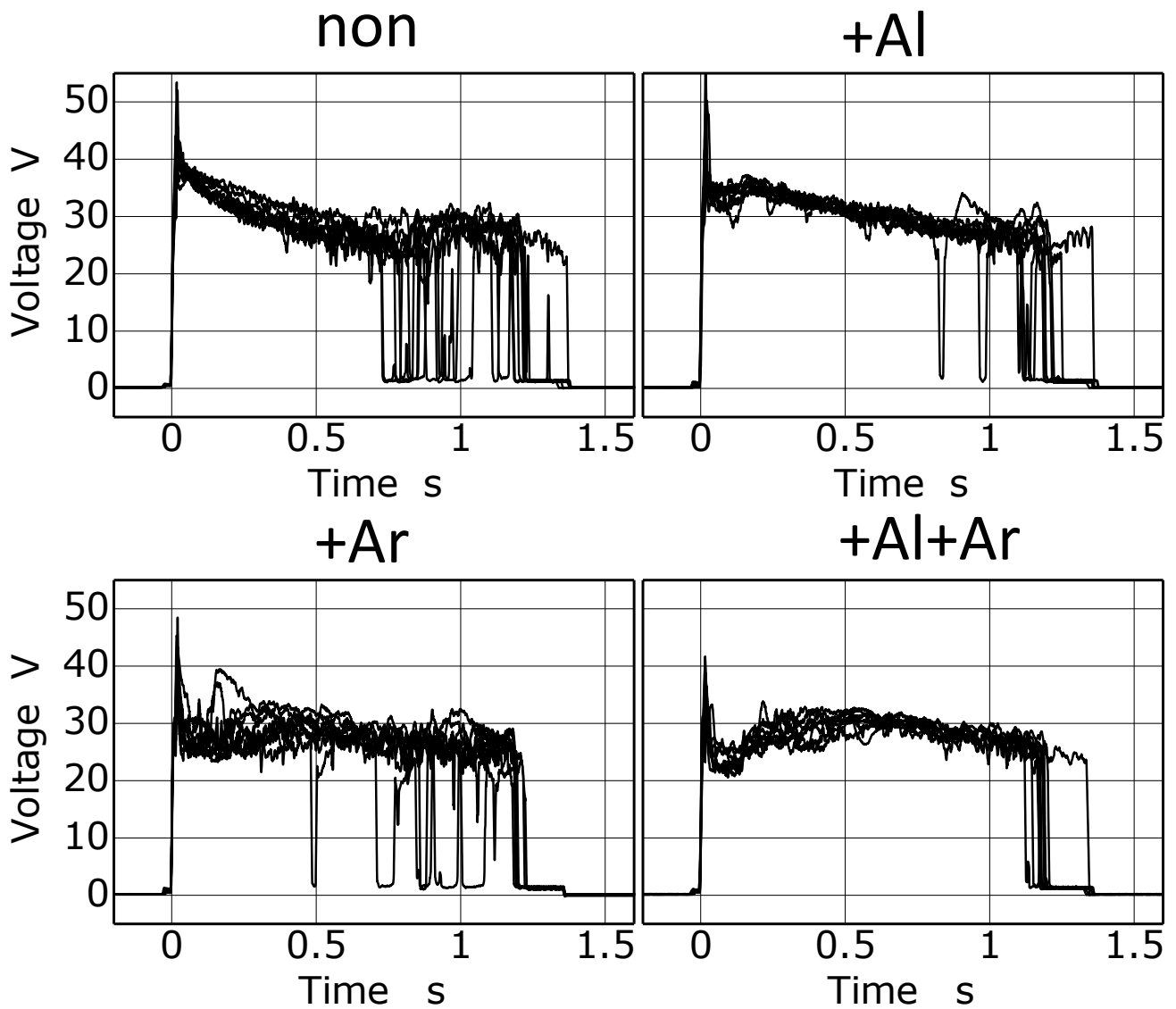


Fig.3—26 Voltage characteristic with ferrule during stud welding

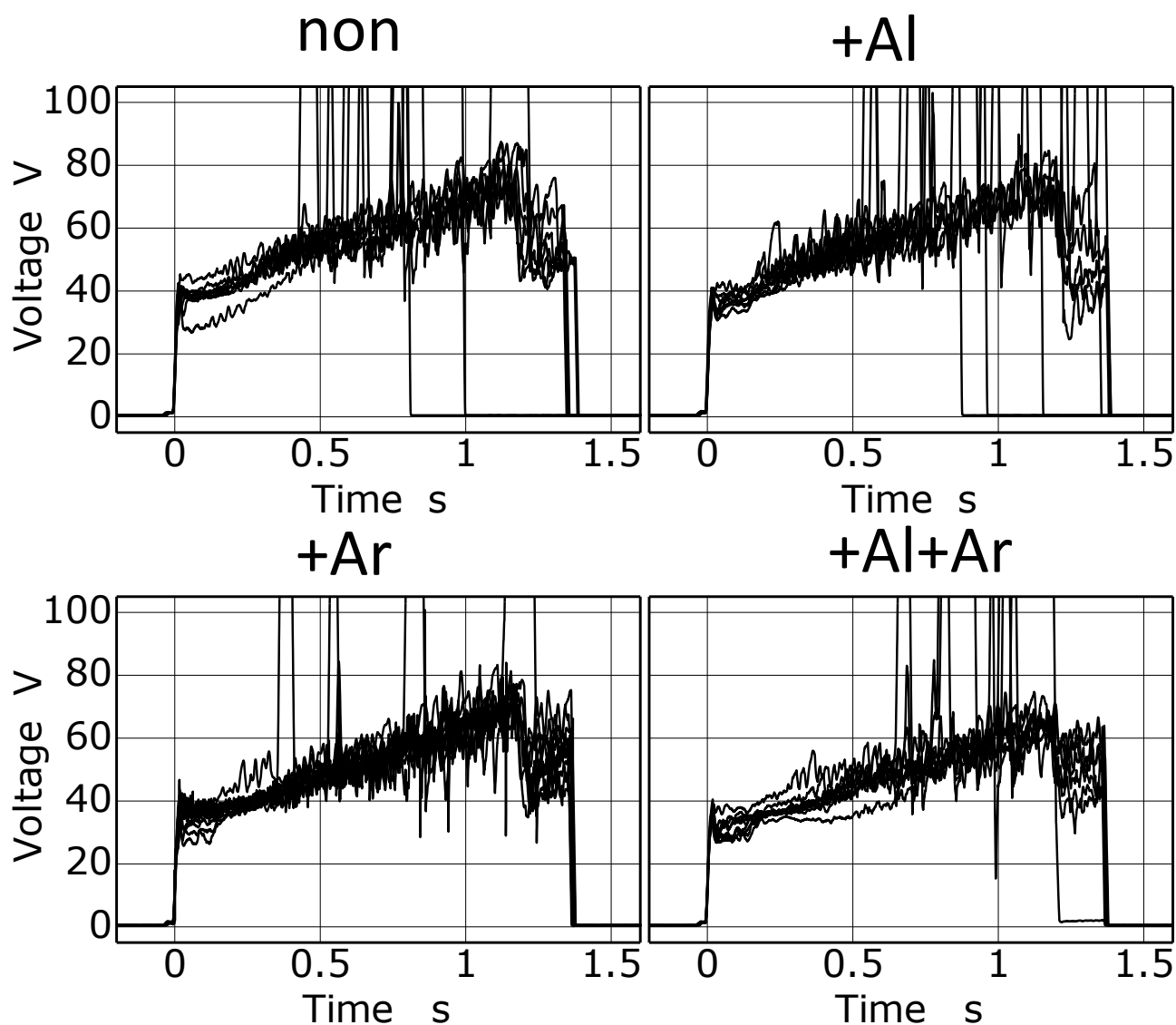


Fig.3—27 Voltage characteristic without ferrule during stud welding

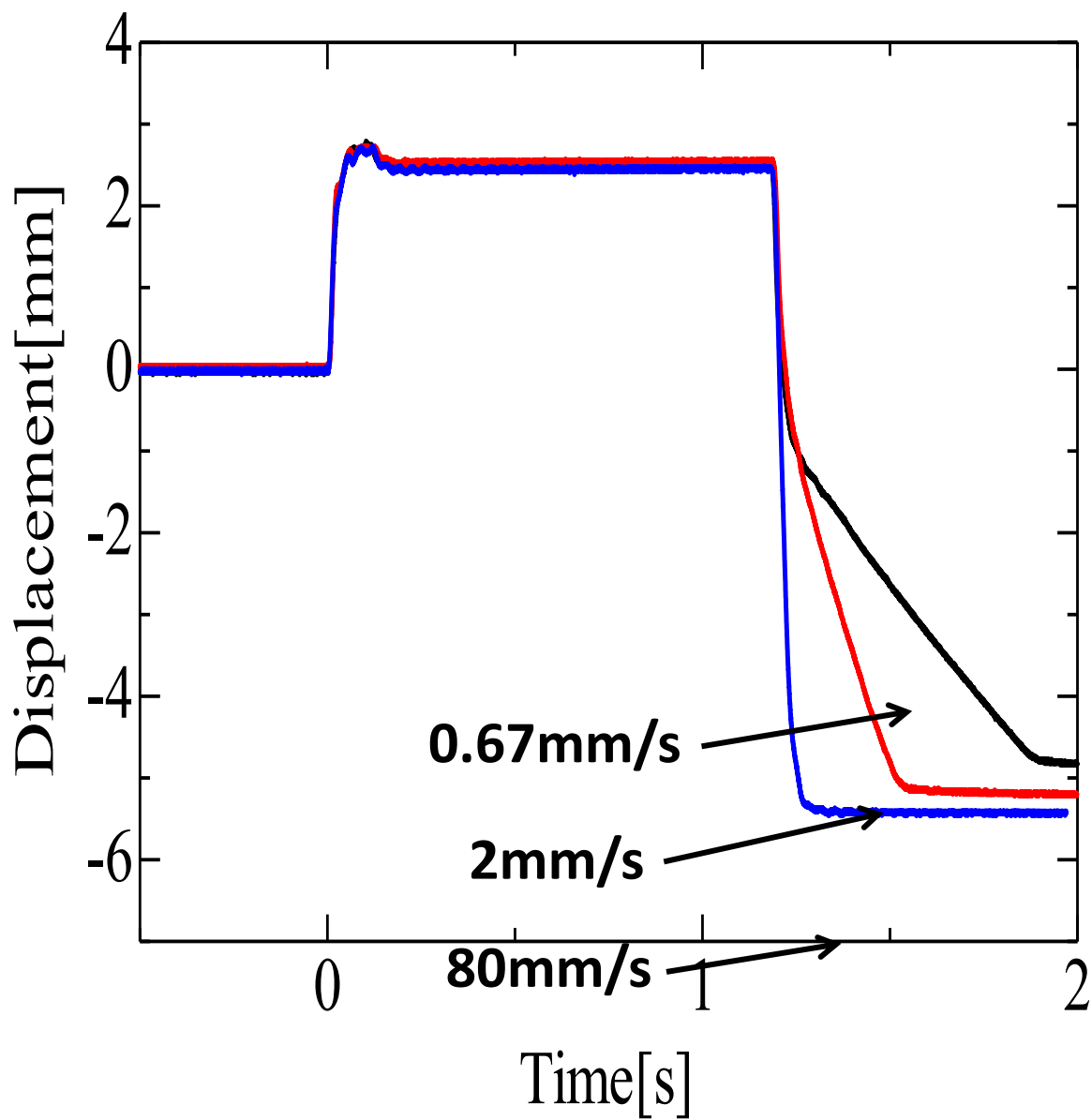


Fig.3—28 Explanation of plunging speed

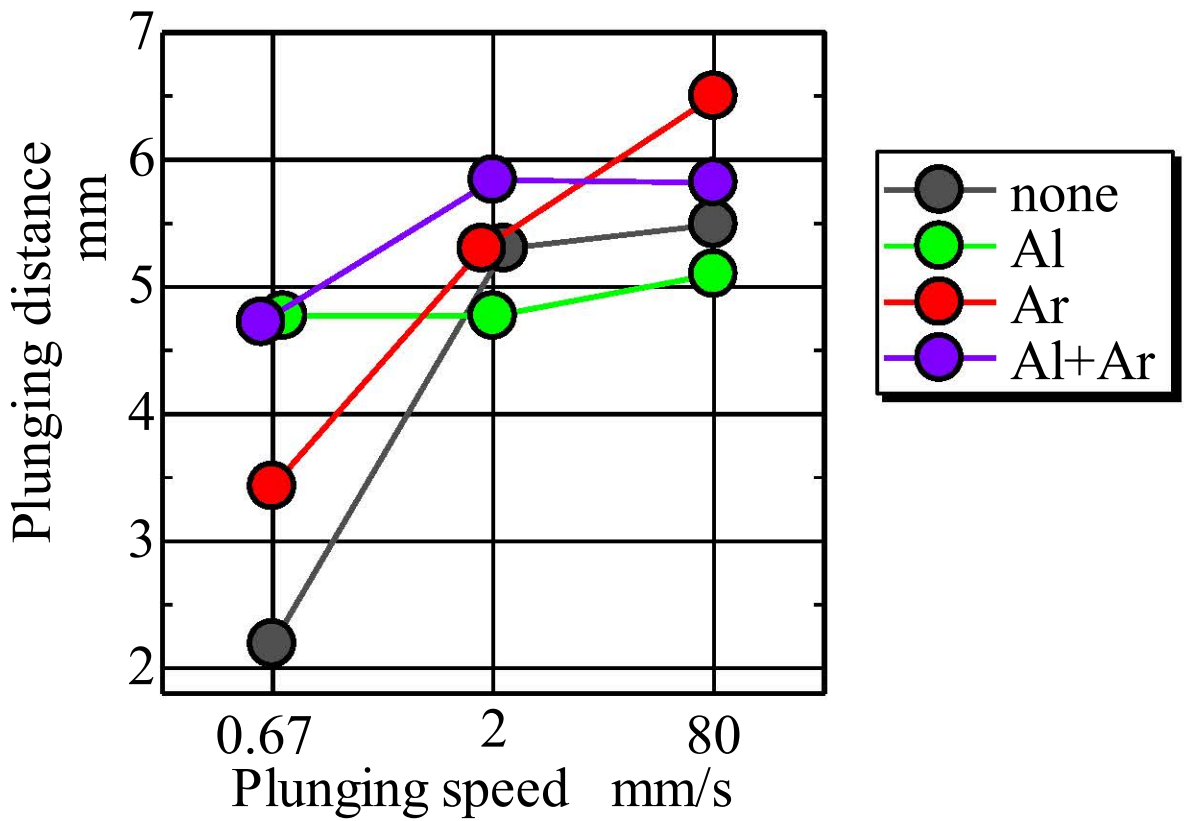
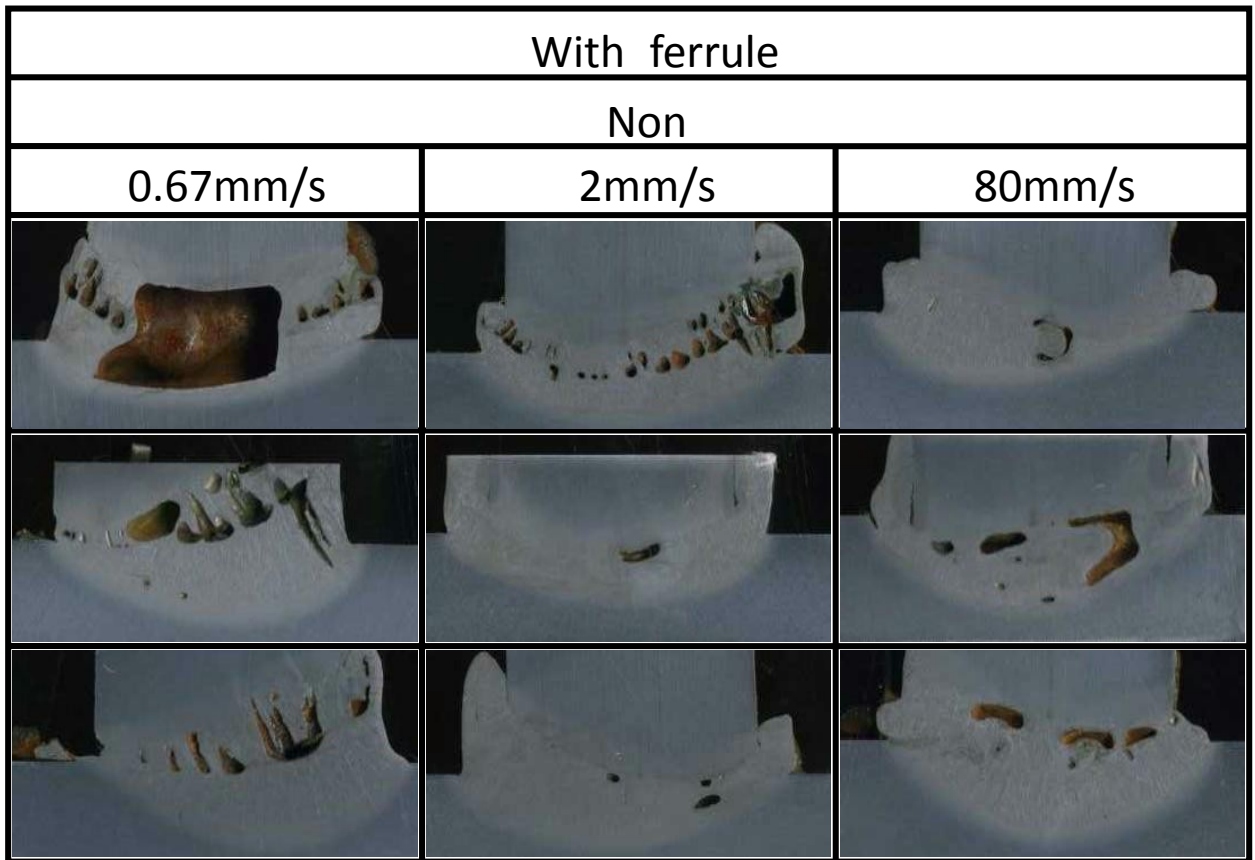
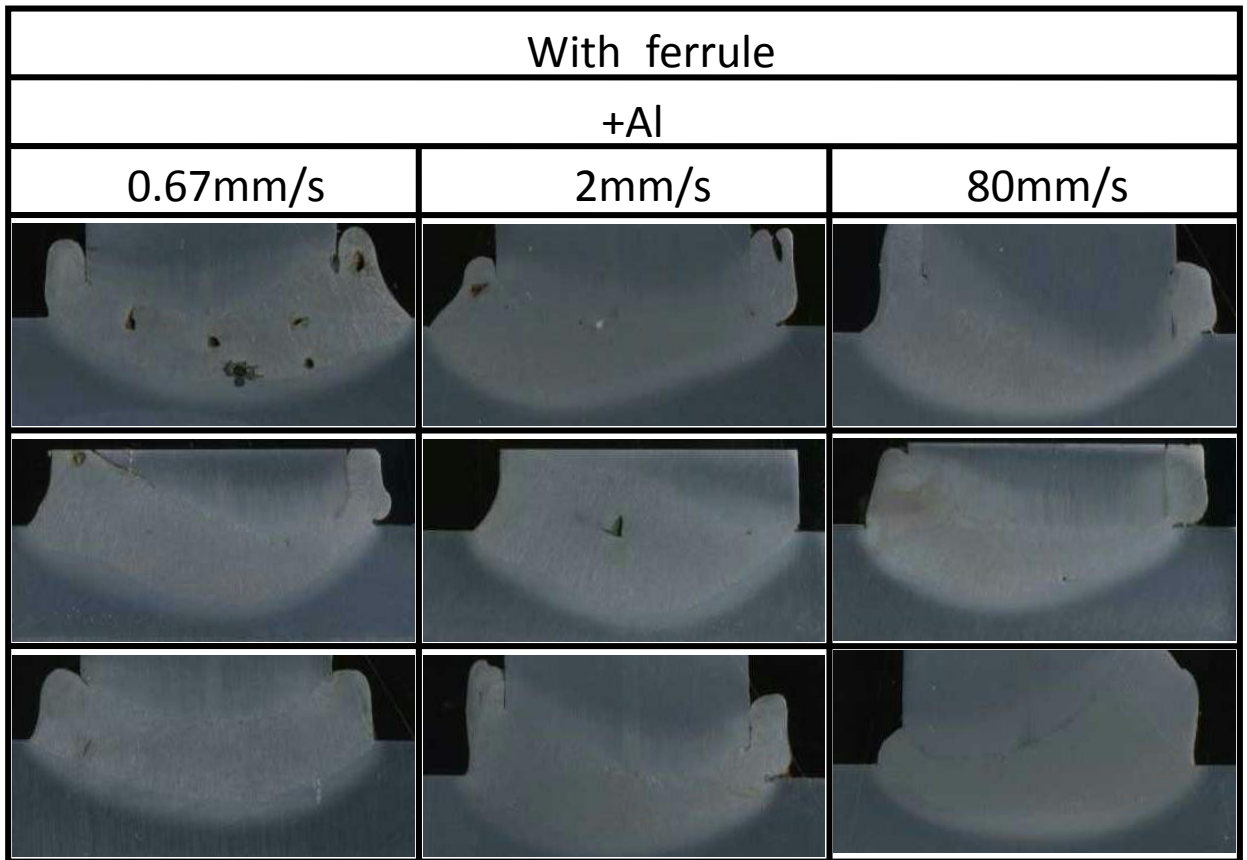


Fig.3-29 Relationship between plunging speed and plunging distance



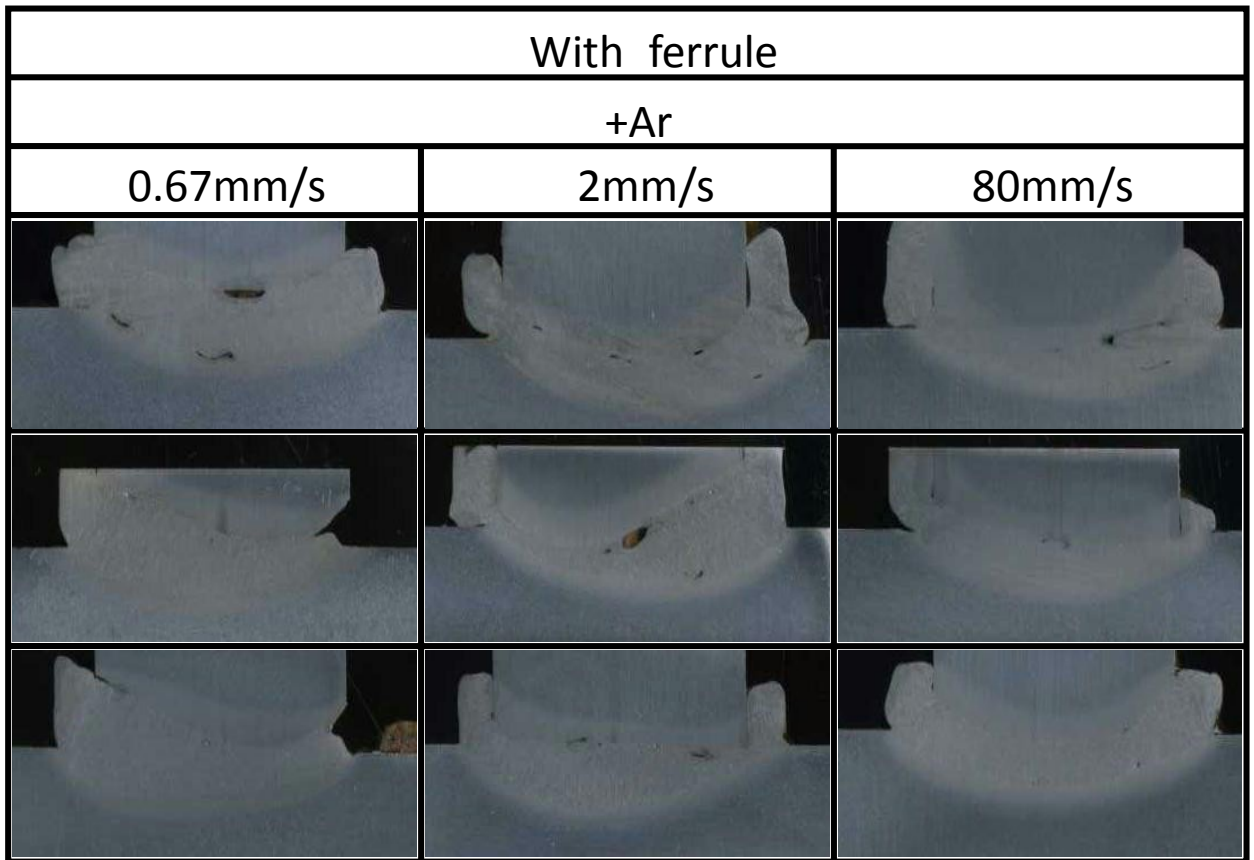
10mm

Fig.3 — 30 Vertical section of stud weld
(Fe, Air, with ferrule)



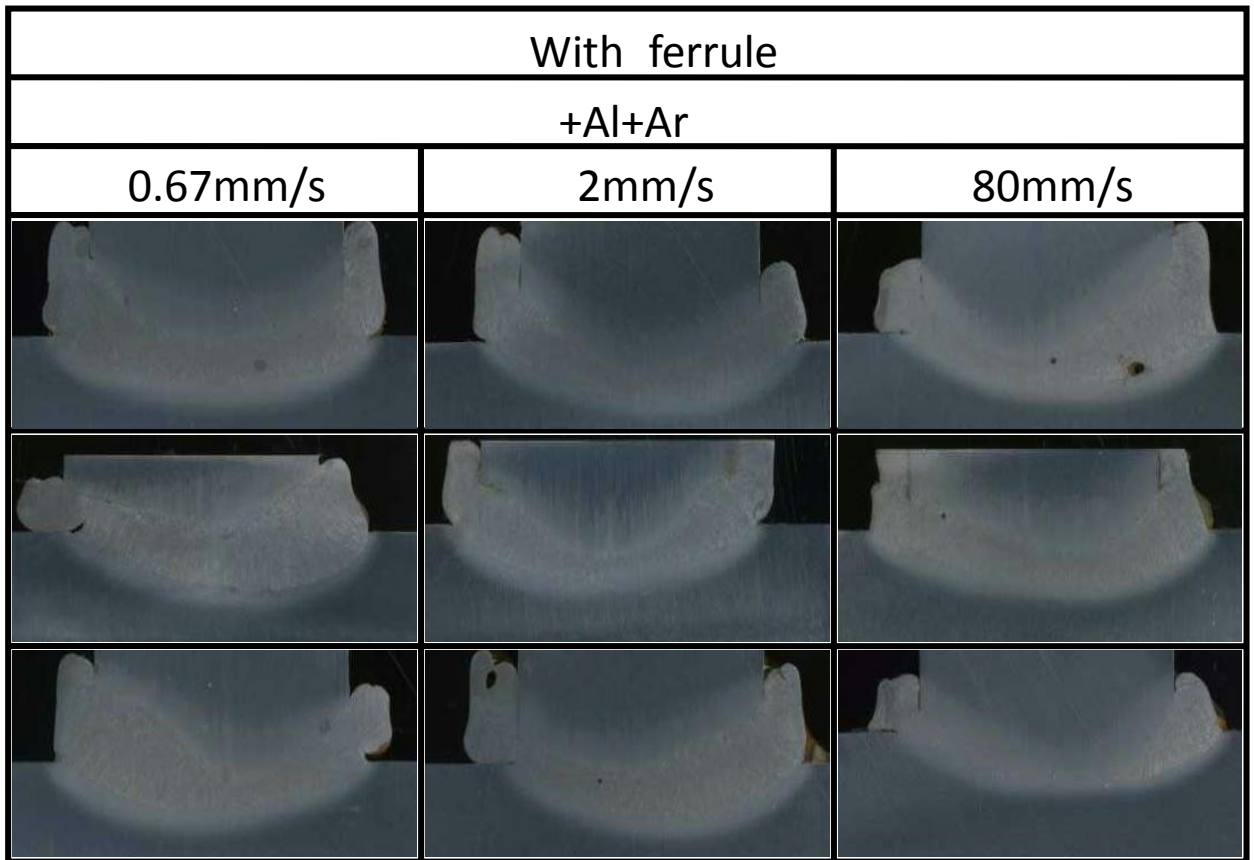
10mm

Fig.3—31 Vertical section of stud weld
(Al, Air, with ferrule)



10mm

Fig.3—32 Vertical section of stud weld
(Fe, Ar, with ferrule)



10mm

Fig.3—33 Vertical section of stud weld
(Al, Ar, with ferrule)

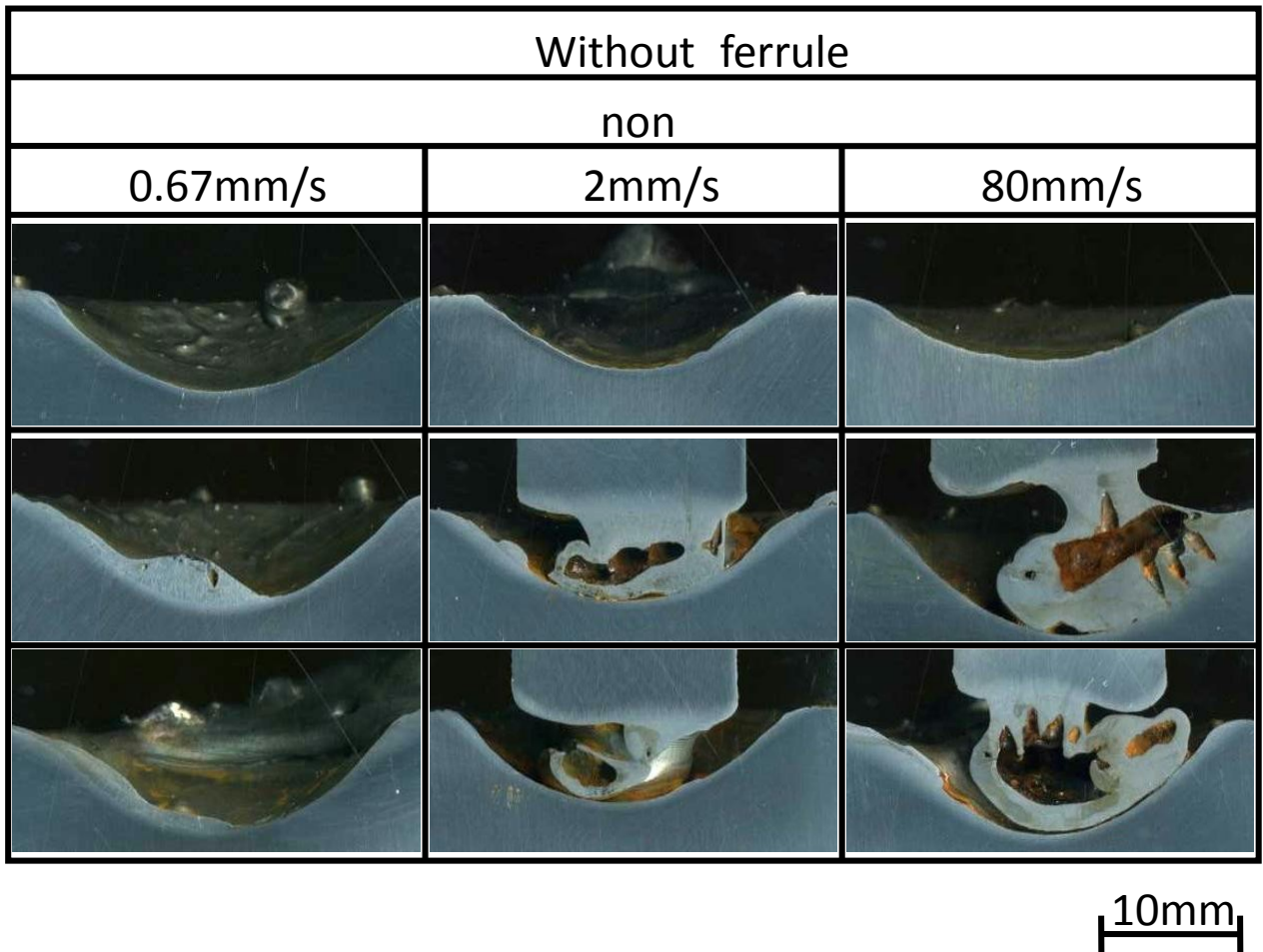


Fig.3 — 34 Vertical section of stud weld
(Fe, air, without ferrule)

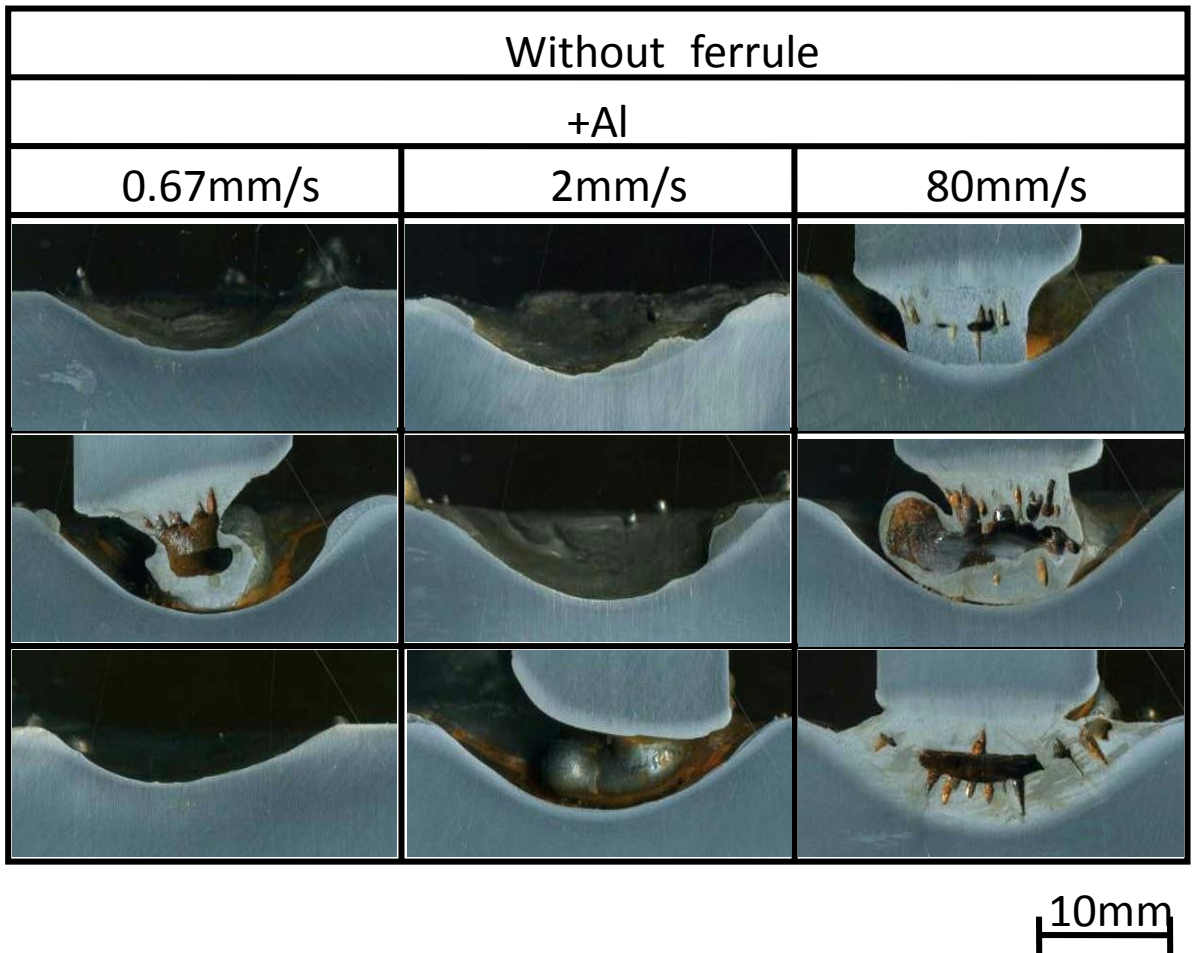
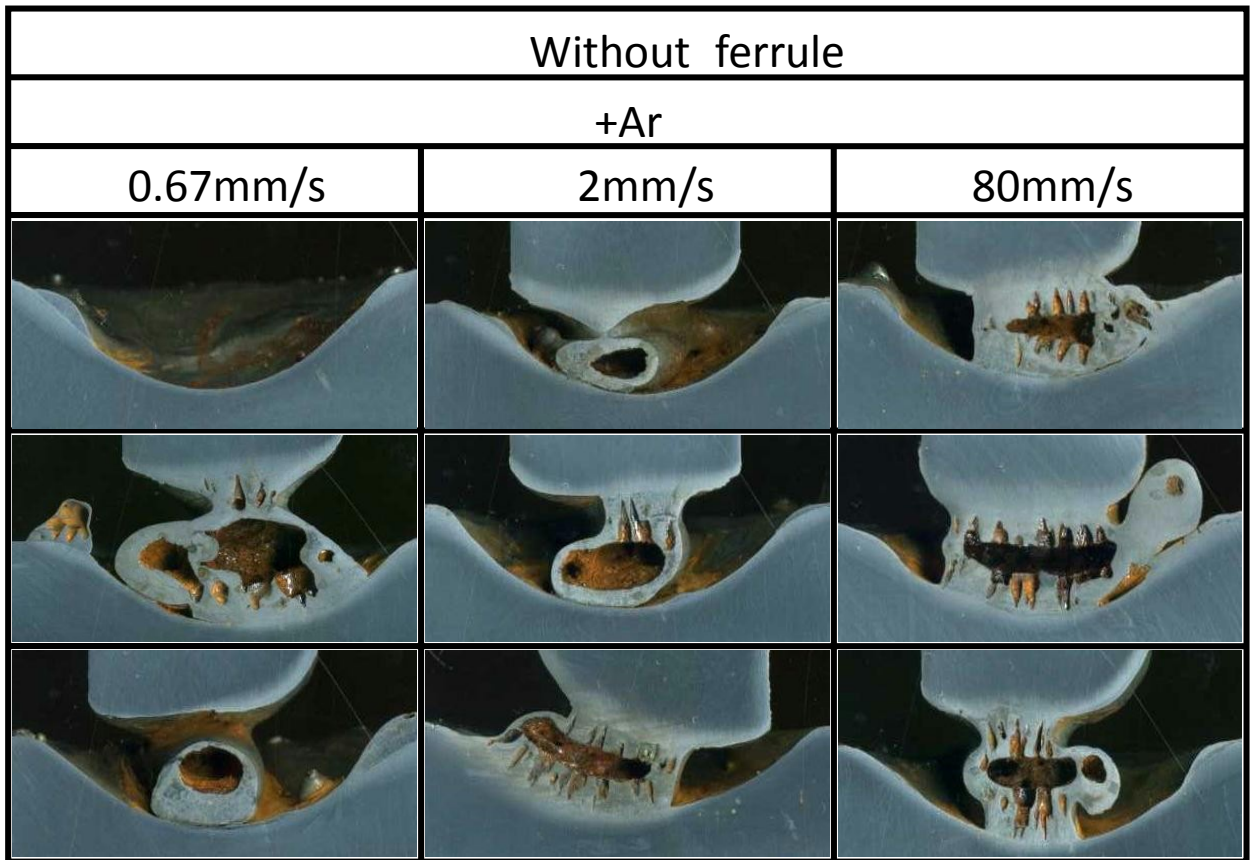
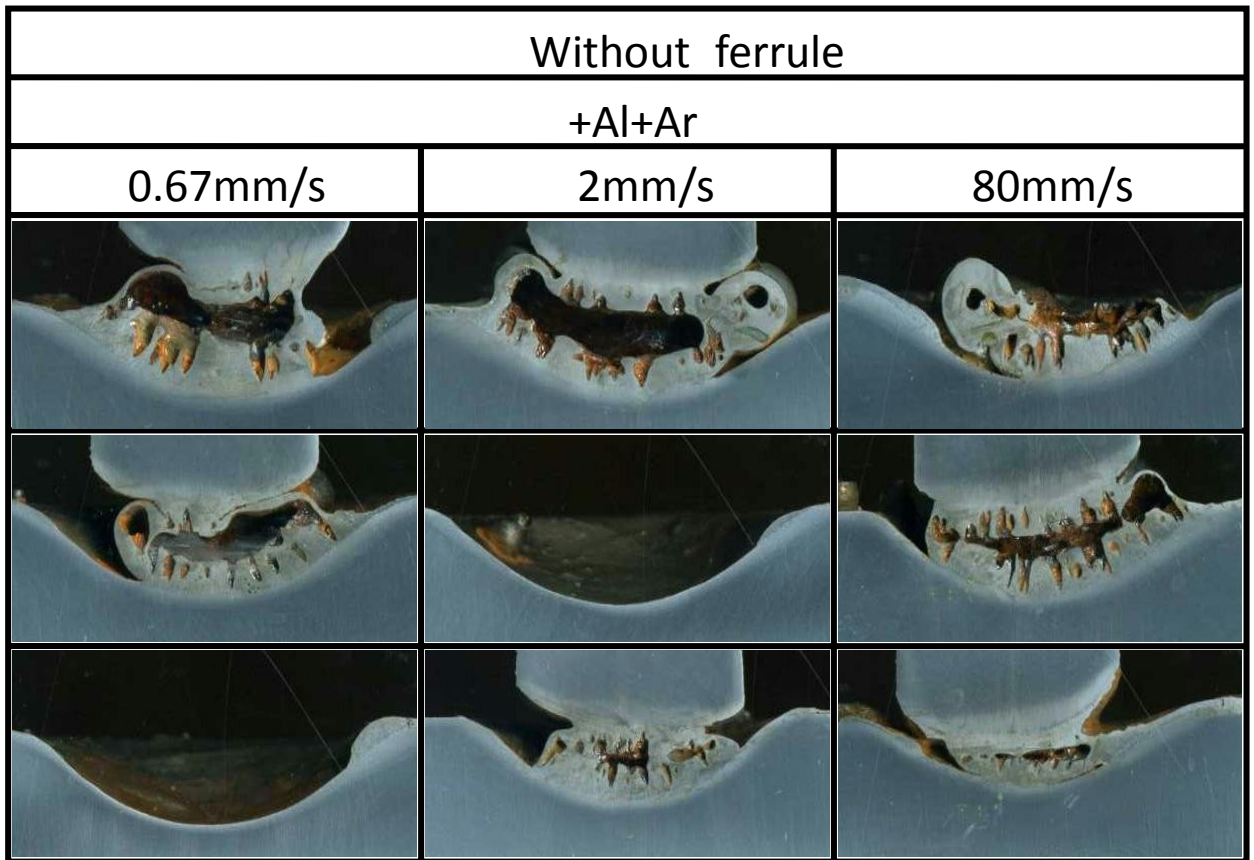


Fig.3 — 35 Vertical section of stud weld
(Al, air, without ferrule)



10mm

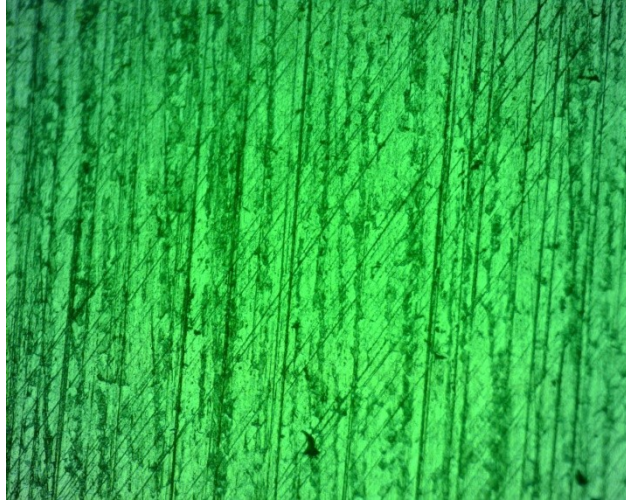
Fig.3 — 36 Vertical section of stud weld
(Fe, Ar, without ferrule)



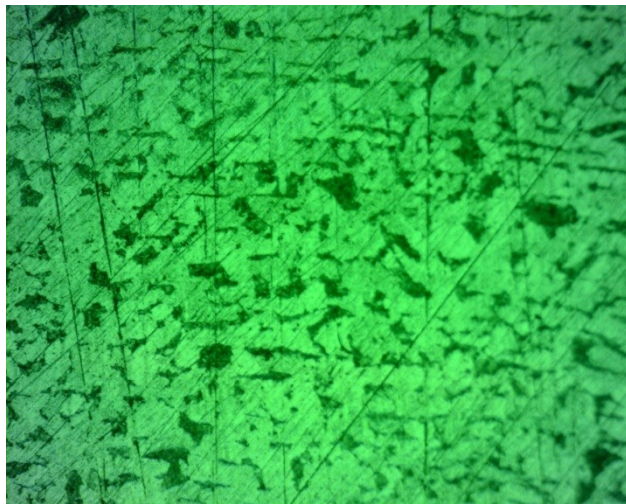
10mm

Fig.3 — 37 Vertical section of stud weld
(Al, Ar, without ferrule)

stud



base metal plate



100 μ m
|————|

Fig.3 — 38 Photomicrograph of stud and base metal plate

Fe, With ferrule

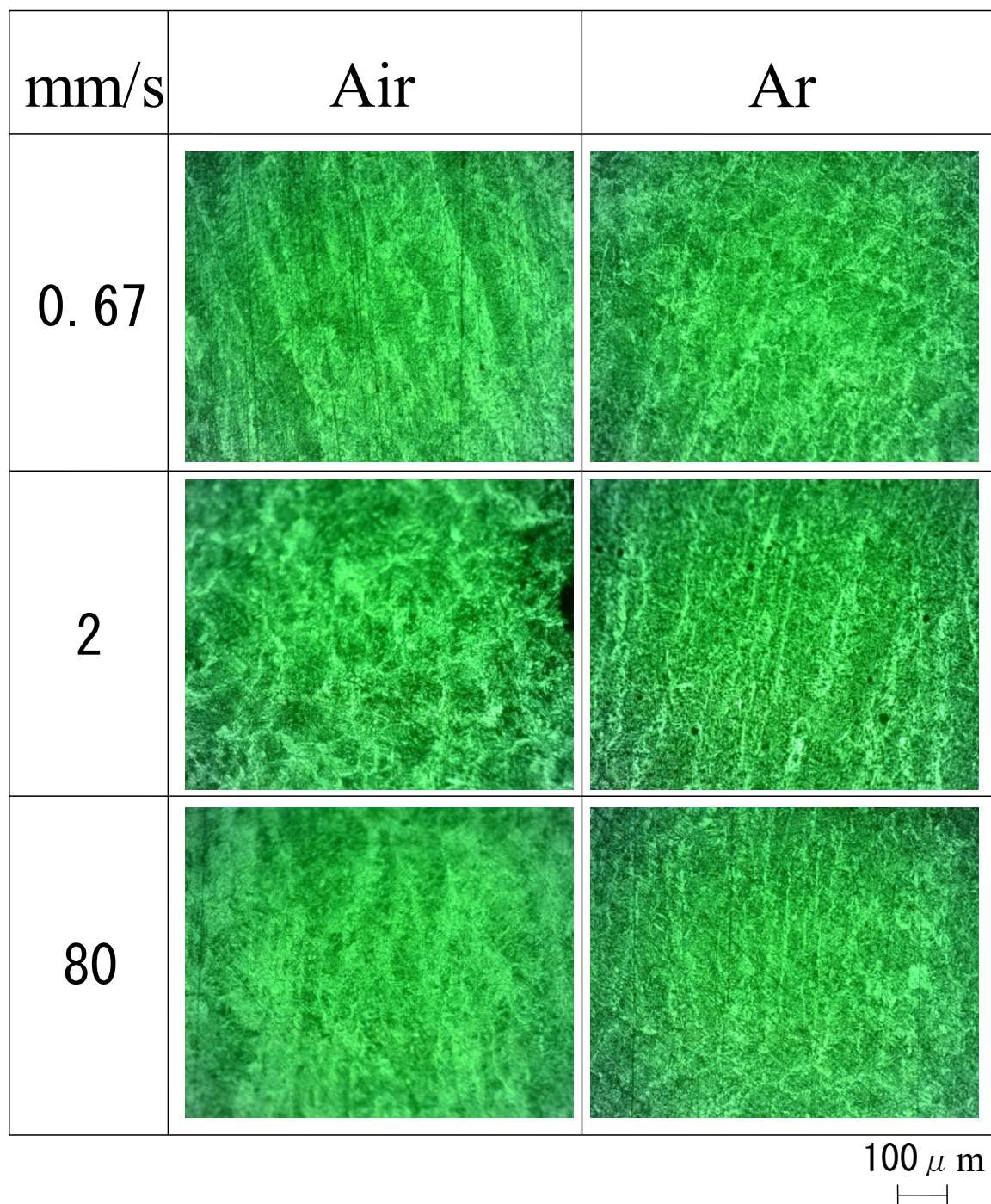


Fig.3 — 39 Photomicrograph of Fe, with ferrule

Al, With ferrule

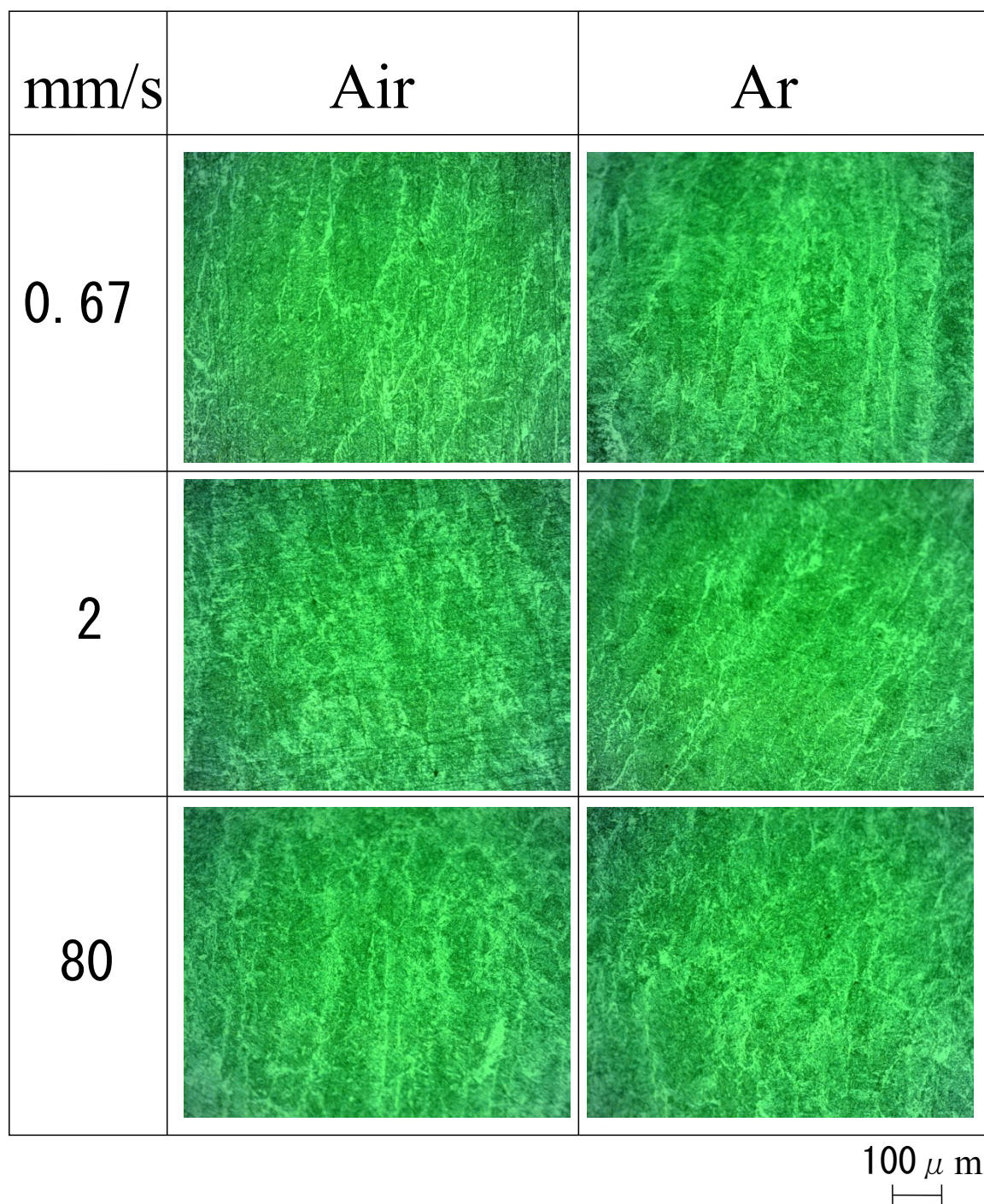


Fig.3—40 Photomicrograph of Al, with ferrule

Fe, Without ferrule

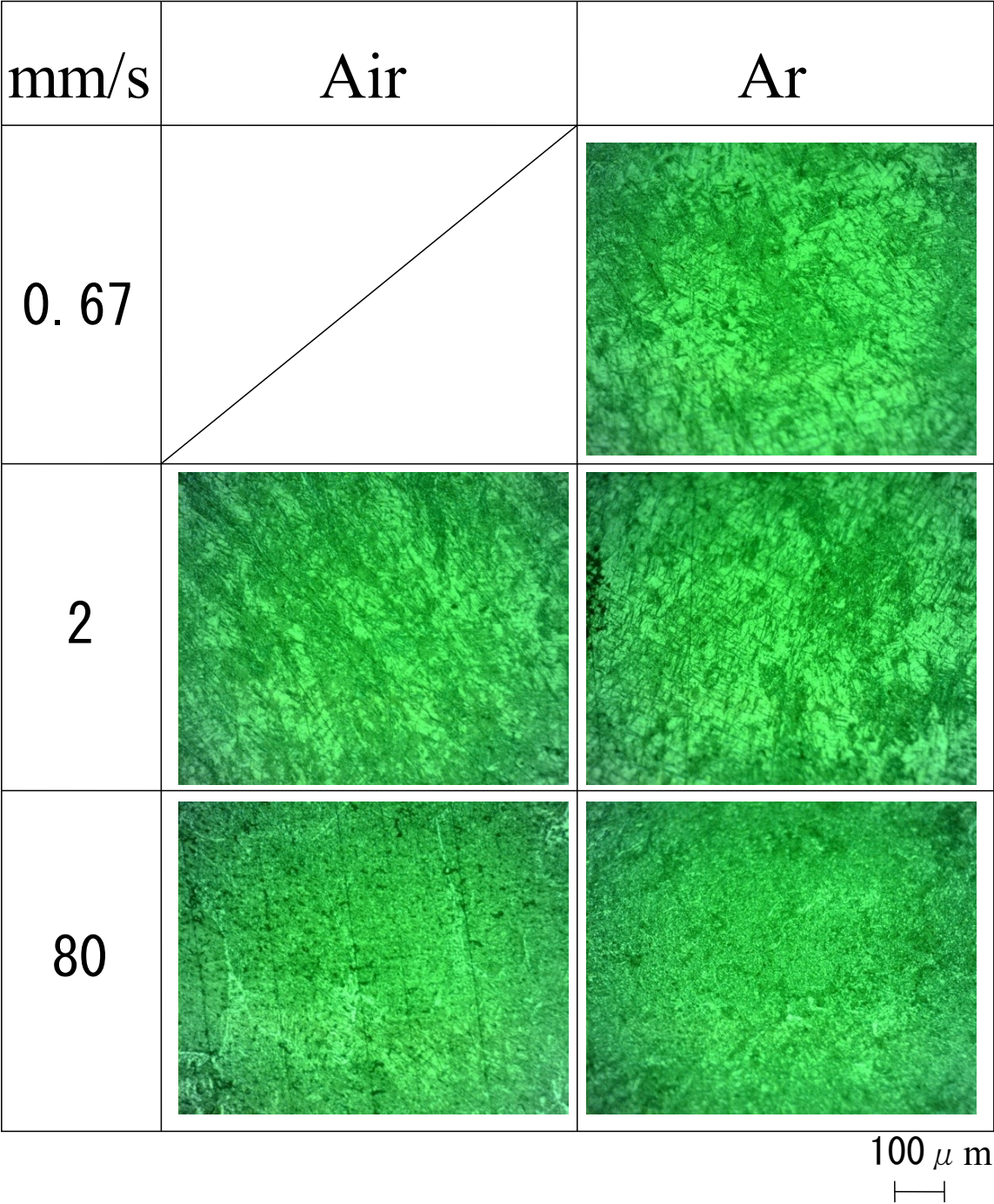


Fig.3—41 Photomicrograph of Fe, without ferrule

Al, Without ferrule

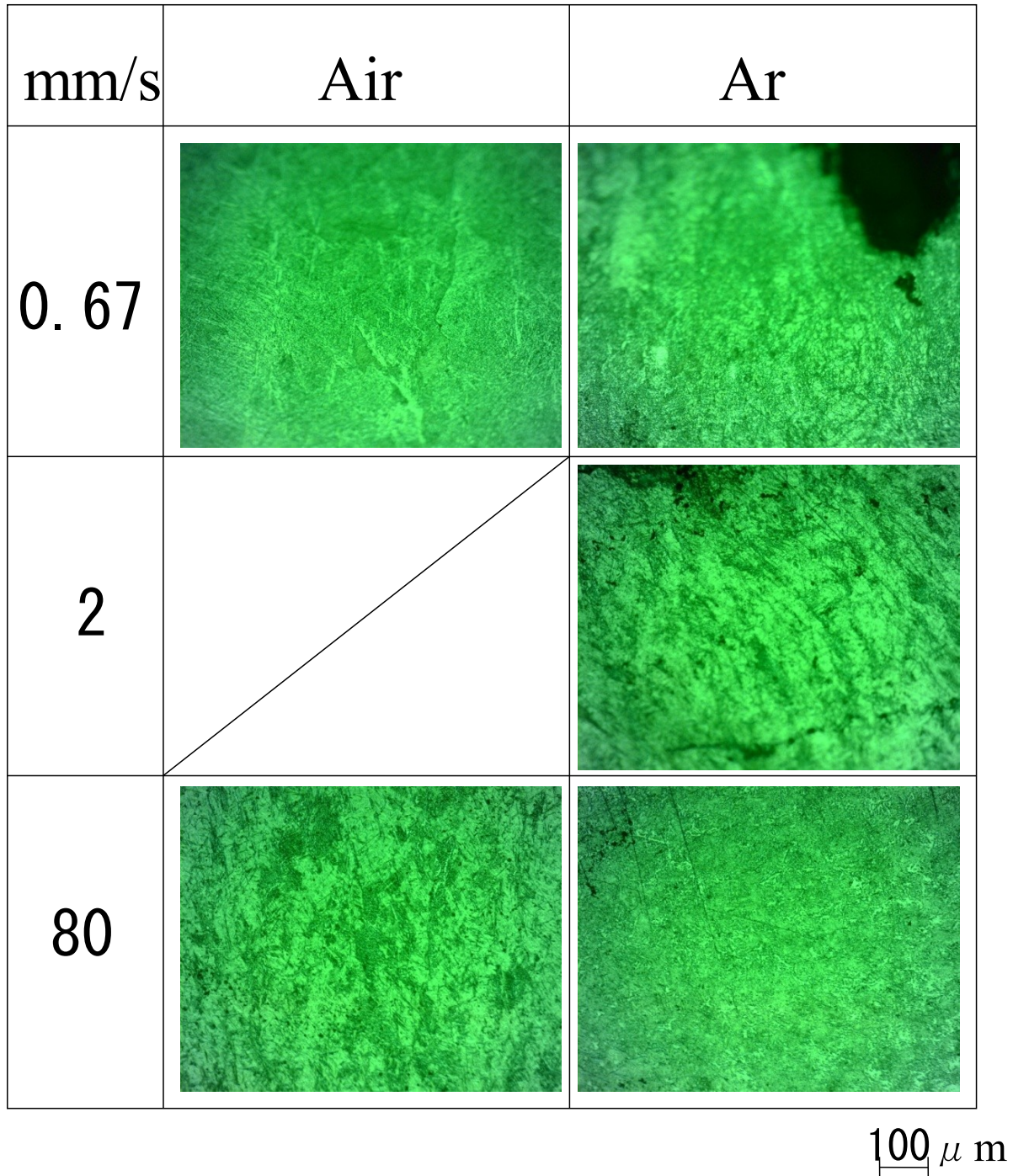
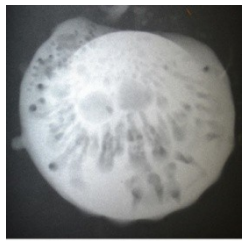
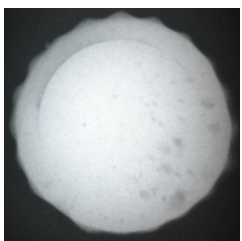
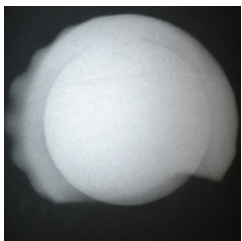
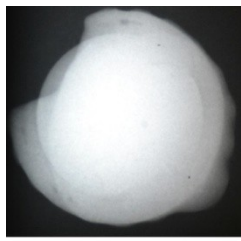
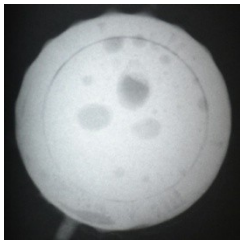
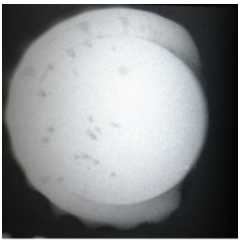
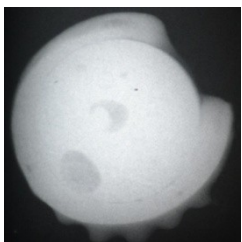
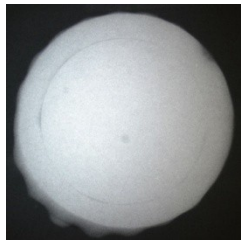
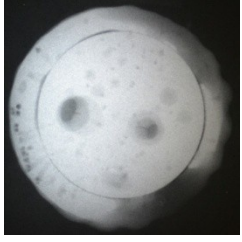
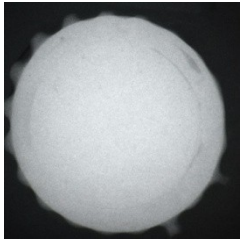
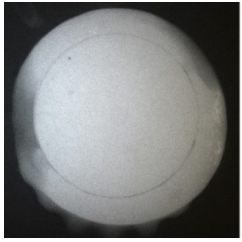
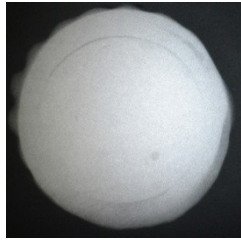


Fig.3—42 Photomicrograph of Al, without ferrule

mm/s	None	+Al	+Ar	+Al+Ar
0.67				
2				
80				

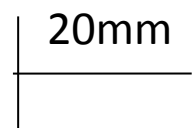


Fig.3—43 X-ray photographs with ferrule

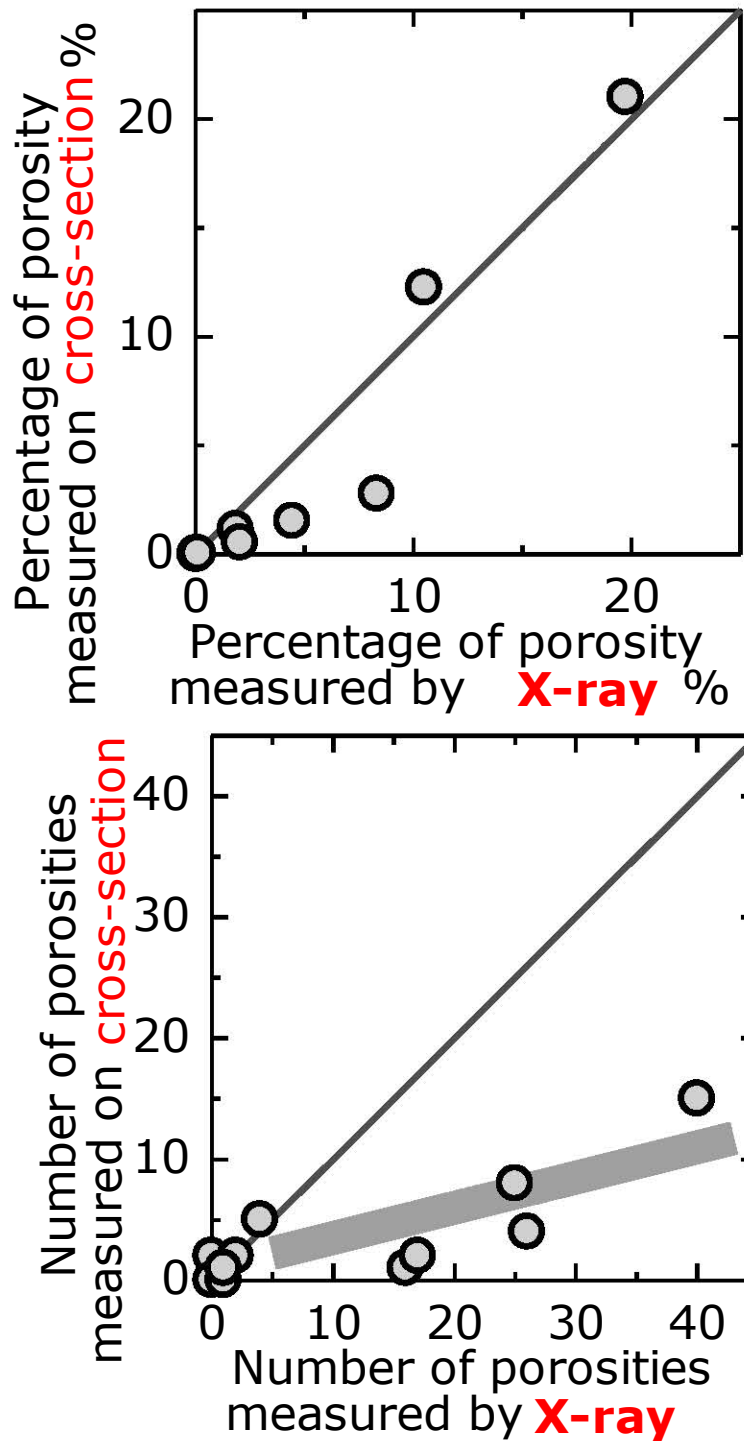


Fig.3—44 Relationship between porosity measured on cross-section and by X-ray

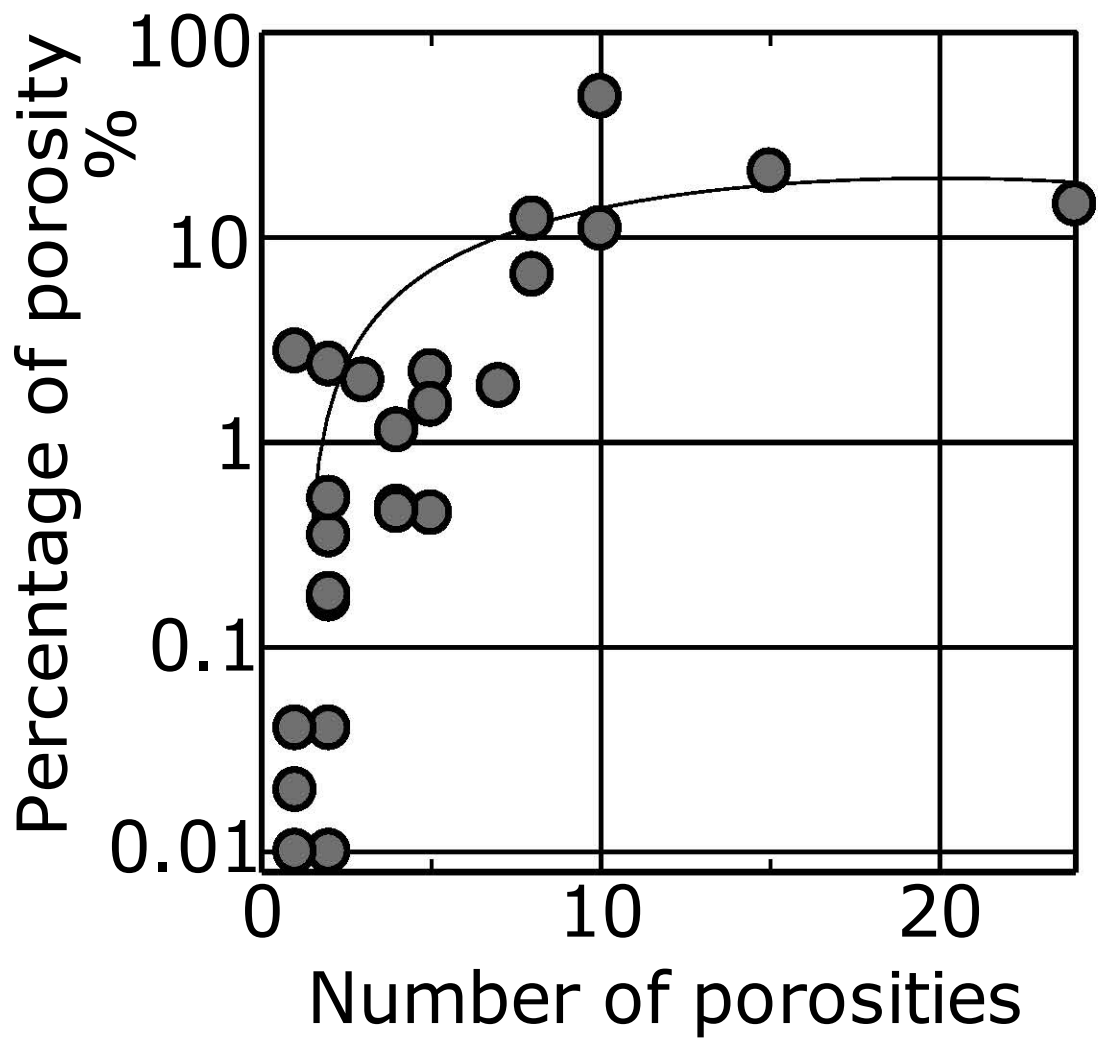


Fig.3-45 Relationship number of porosities and percentage of porosity

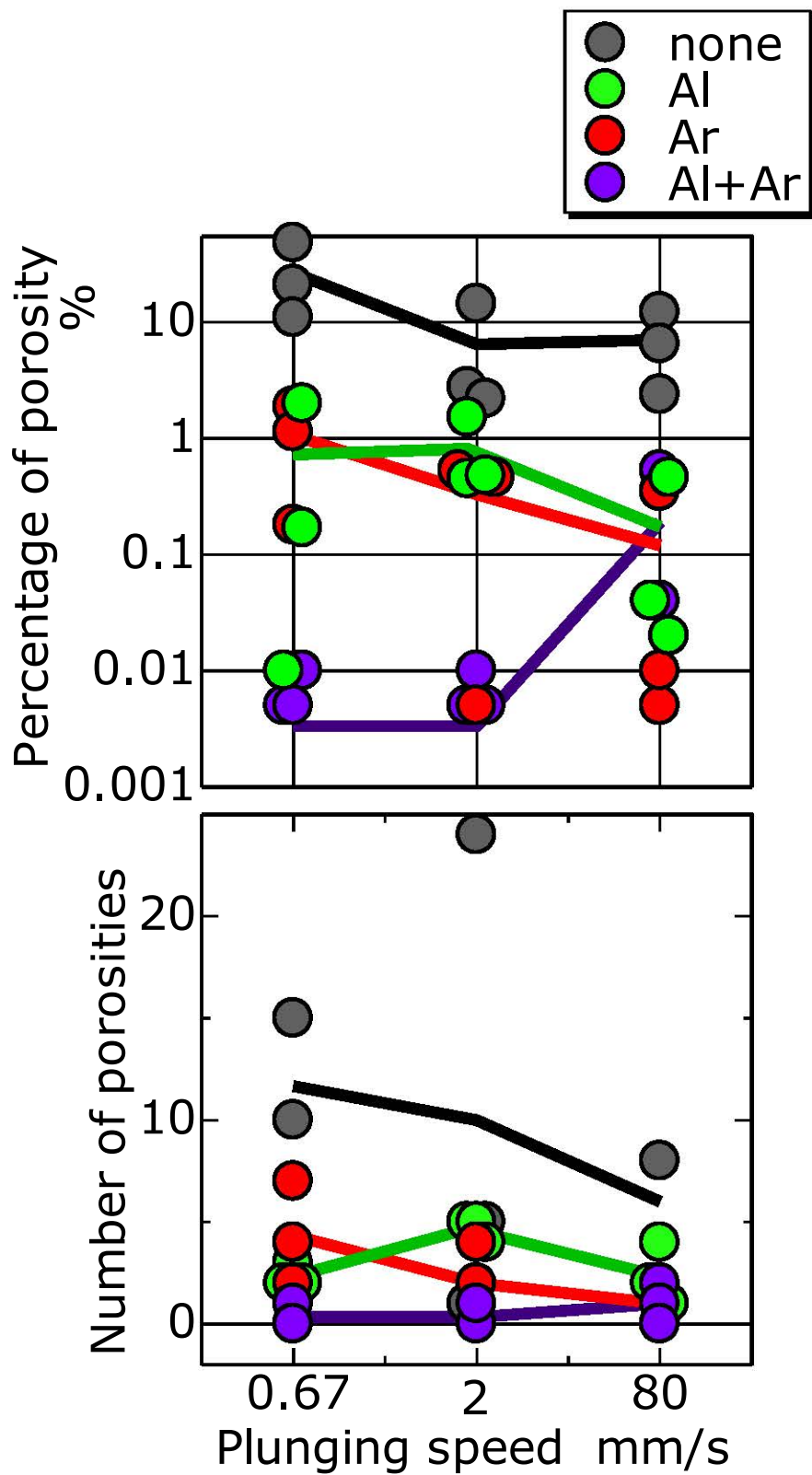


Fig.3—46 Relationship between plunging speed and porosity

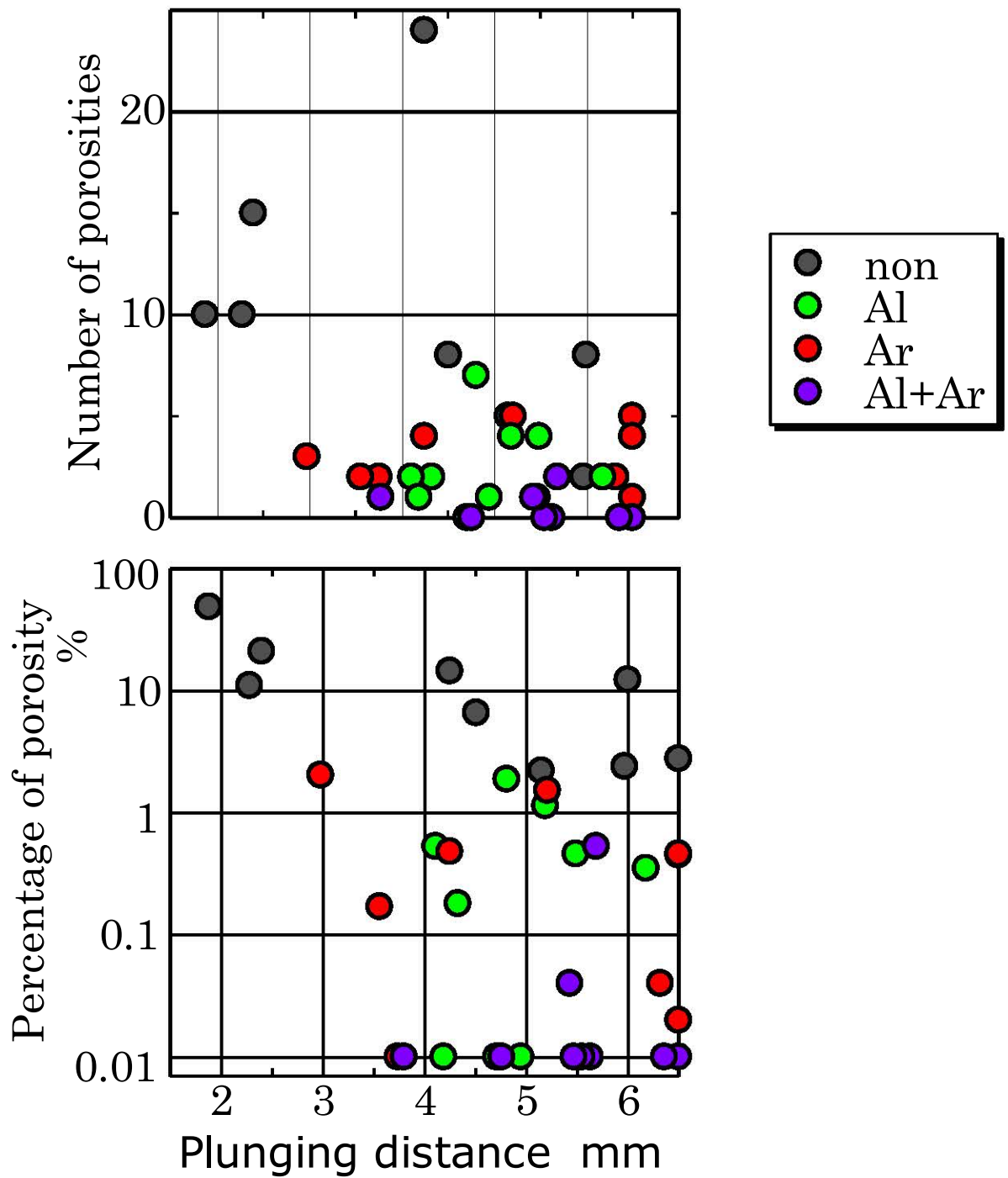


Fig.3—47 Relationship between plunging distance and porosity

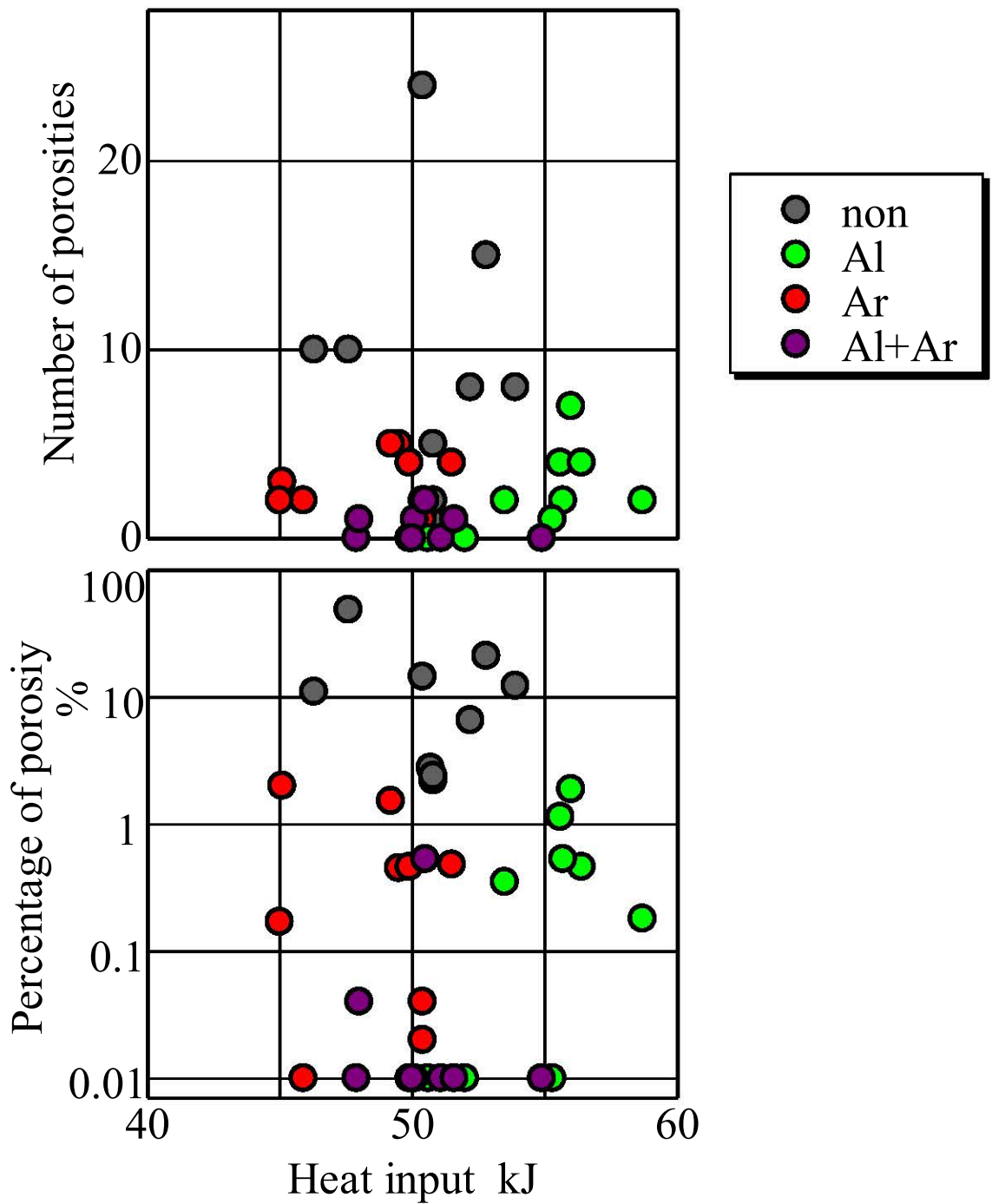


Fig.3—48 Relationship between heat input and porosity

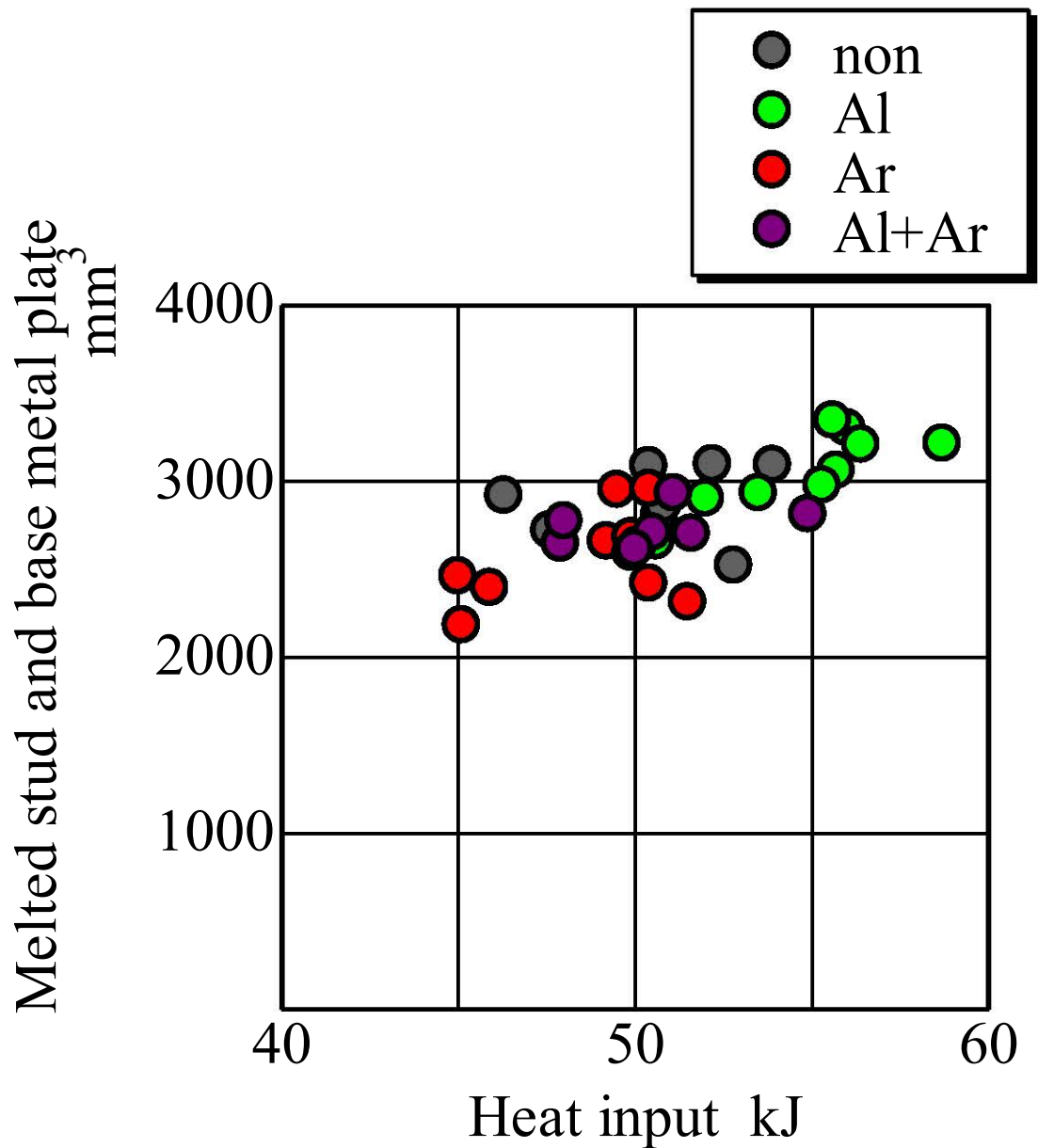
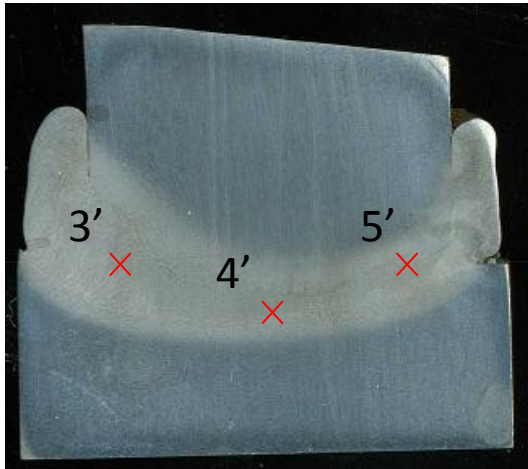
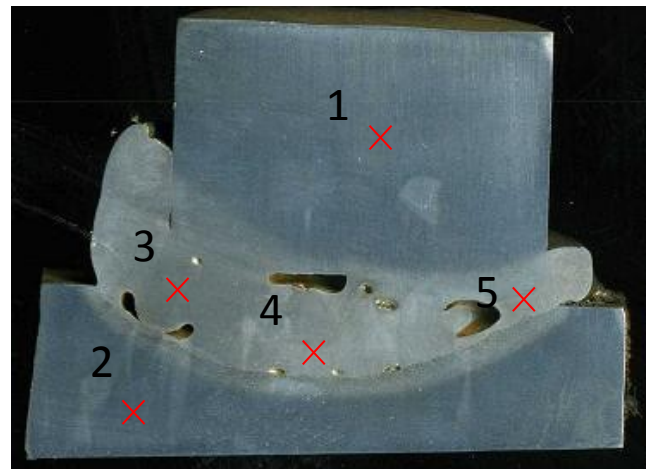


Fig.3 — 50 Relationship between heat input and melted stud and base metal plate

(a)+Al



(b)Without Al



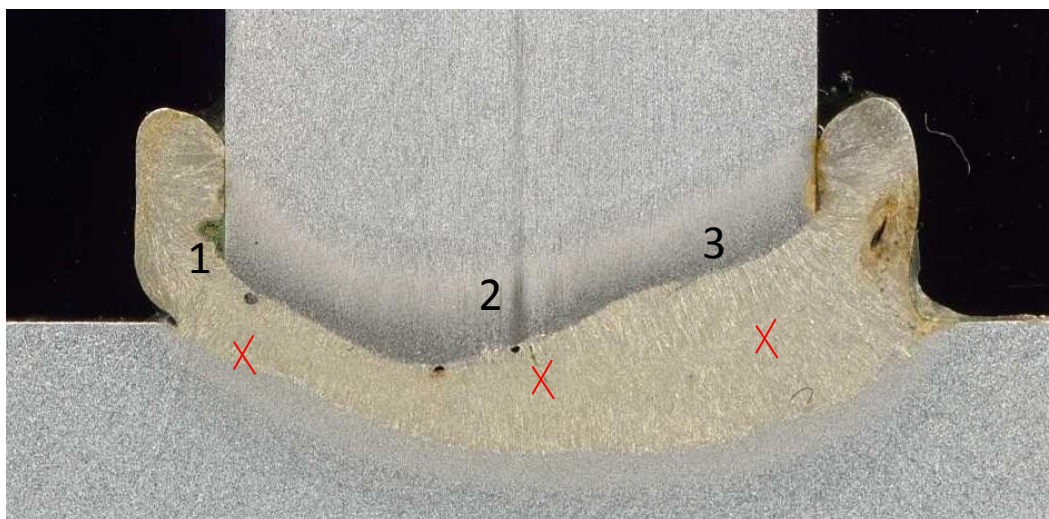
Mass%	Fe	Mn	Si	C	O	Al
1	92.19	1.44	0.37	3.98	1.73	0.29
2	89.79	1.44	0.28	5.95	2.16	0.37

Mass%	Fe	Mn	Si	C	O	Al
3	91.54	0.88	0.76	4.10	2.50	0.21
4	90.45	1.48	0.57	4.10	3.19	0.22
5	93.58	0.61	0.50	2.13	2.87	0.31

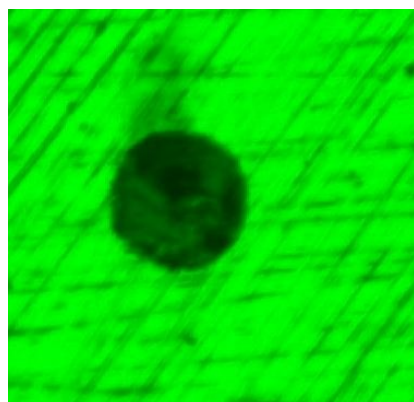
Mass%	Fe	Mn	Si	C	O	Al
3'	89.57	1.42	0.64	4.00	3.53	0.84
4'	89.30	1.79	0.68	4.20	3.29	0.73
5'	89.71	0.91	0.59	4.26	3.64	0.90

Fig.4-1 Test point of quantiative analysis

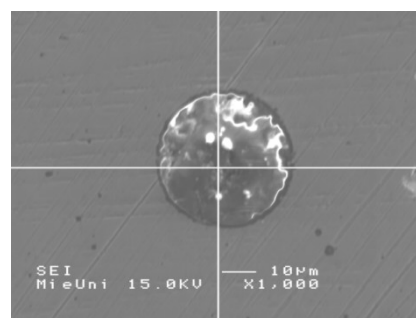
+Al



in optical microscope of 2



in SEM of 2



10µm
H

Mass %	Fe	Mn	Si	C	O	Al
1	8.30	0.85	0.67	1.86	45.83	42.50
2	4.05	0.86	0.27	1.40	49.97	43.45
3	2.08	0.64	0.34	1.04	51.79	44.12

Fig.4-2 Test point of quantiative analysis 2

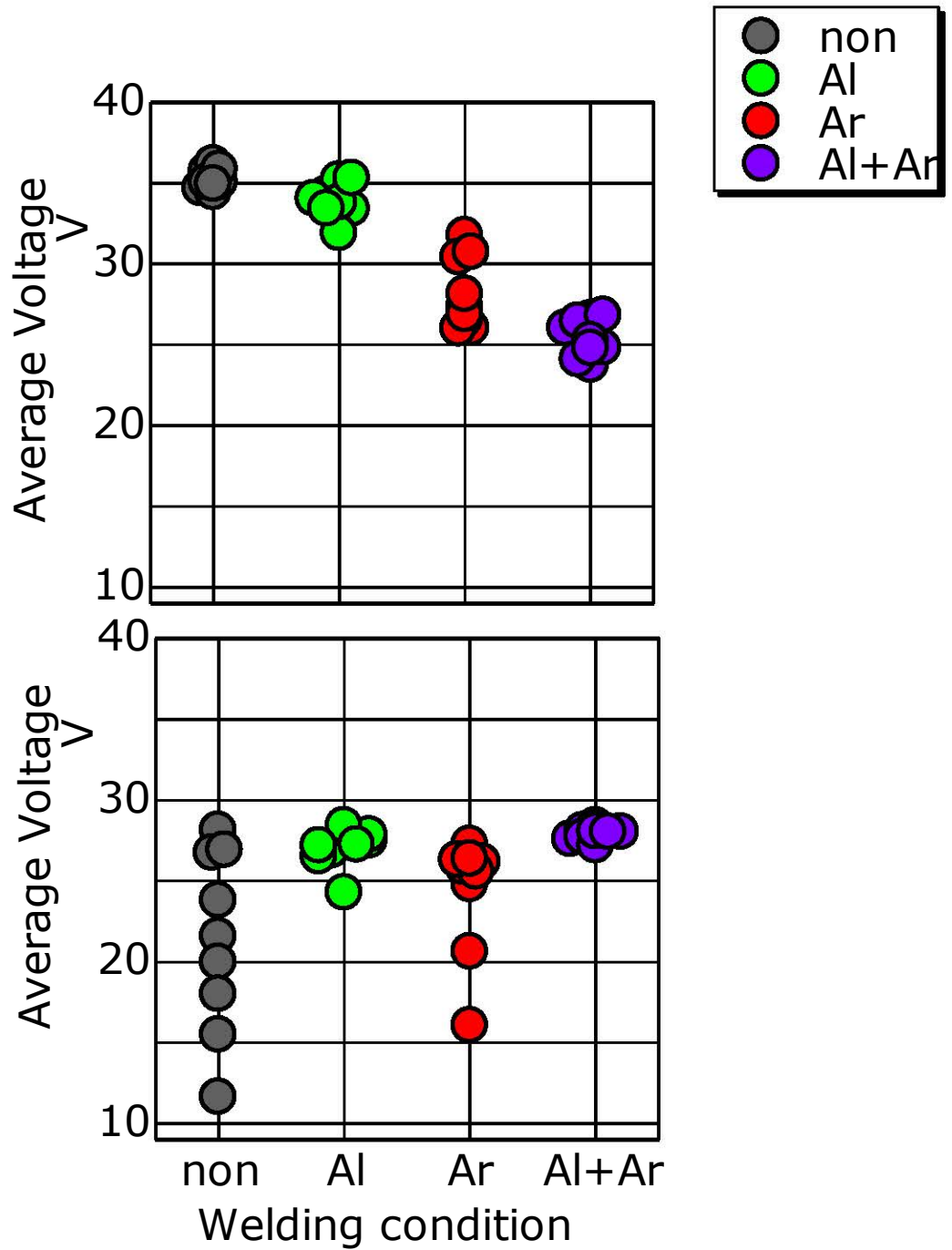


Fig.4—3 Relationship between welding condition and average voltage

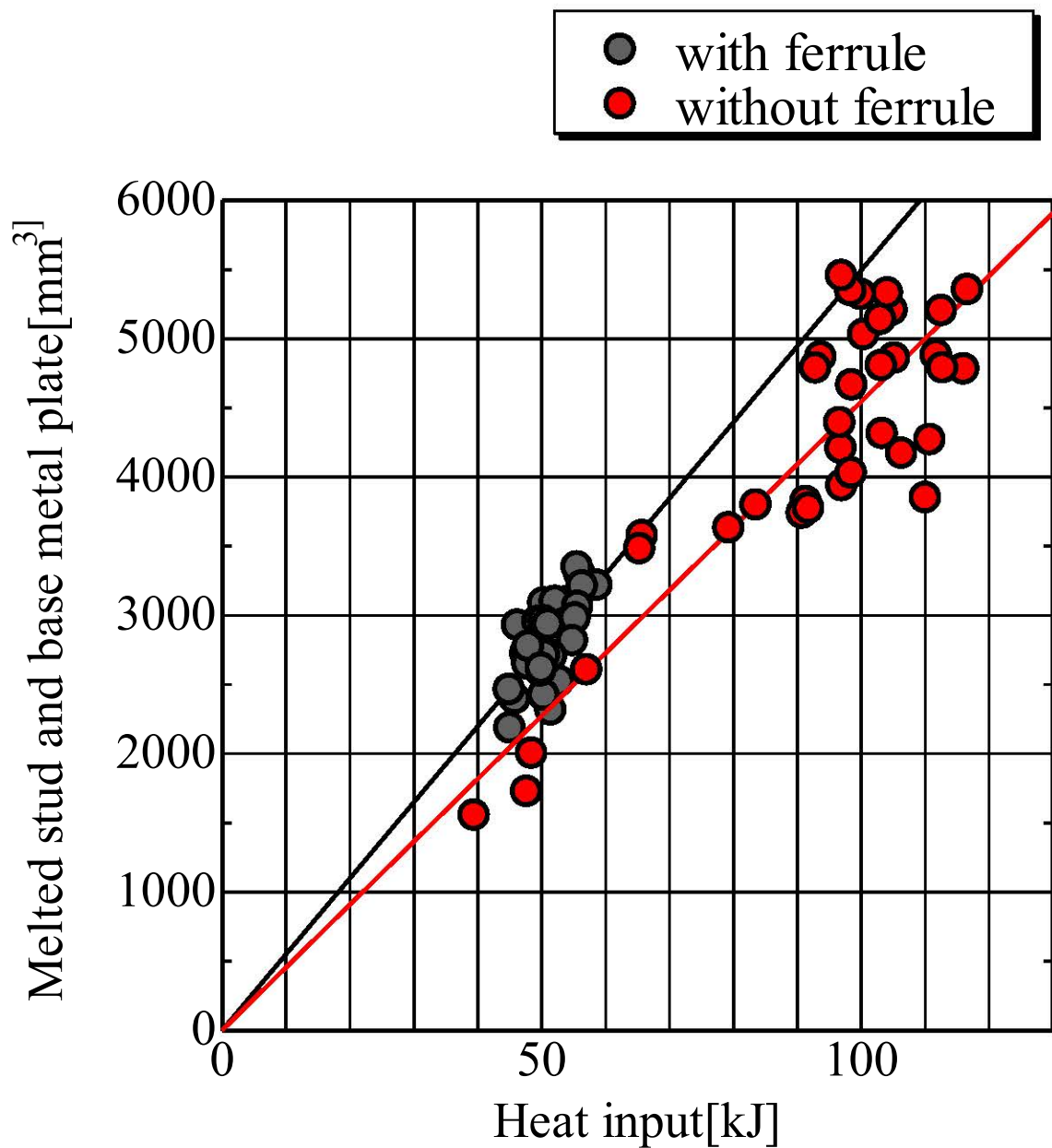


Fig.4—5 Relationship between heat input and volume of weld metal

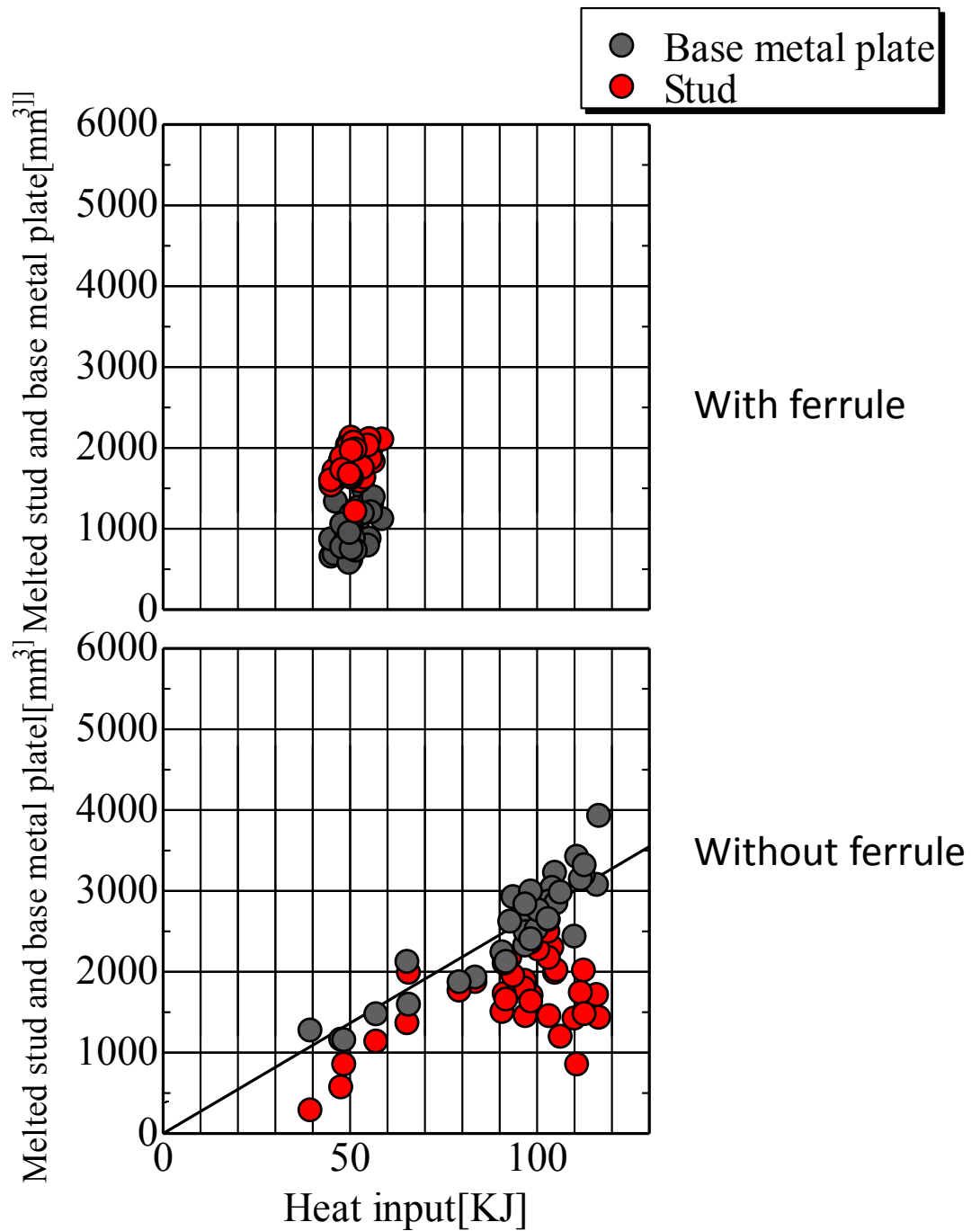


Fig.4—6 Relationship between heat input and volume of weld metal of base metal and stud